

**UNTERSUCHUNG DER ABWEICHUNGEN ZWISCHEN
STANGENFLÜGELPRÜFUNGEN UND SEILFLÜGELPRÜFUNGEN**

M. Hengl
G. Grossschaedl

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluß der Befestigungsart (Stangenflügel, Seilflügelabhängung) von hydrometrischen Flügeln bei der Prüfung wird untersucht. Die Ergebnisse von 40 Vergleichsprüfungen zeigen, daß die Differenzen zwischen einem Stangenflügel und einem Seilflügel mit 50 kg-Gewichtsstück im Mittel nur 2 Promille betragen. In der Regel liegen die Differenzen unter 1 %. Größere Differenzen treten nur bei Geschwindigkeiten unter 0,25 m/s auf. Eine eigene Prüfung als Seilflügel ist nur dann zweckmäßig, wenn der Flügel bei Geschwindigkeiten von weniger als 0,25 m/s verwendet wird. Bei größeren Geschwindigkeiten ist der, durch die Befestigungsart verursachte Unterschied für die hydrographische Meßpraxis vernachlässigbar.

**INVESTIGATION OF THE DIFFERENCES BETWEEN CALIBRATION
OF CURRENT METERS (PROPELLER-TYPE) MOUNTED
ON A ROD OR SUSPENDED ON A CABLE**

SUMMARY

The influence of mounting methodology (rod-supported or cable suspended) of current meters (propeller-type) on their calibration are investigated. The analysis of 40 comparisons shows on average only 2 per mille difference between rod-support and suspension on a cable using a 50 kg sinker weight. As a rule the differences are lower than 1 %. Higher differences are possible in case of velocities lower than 0,25 m/s. A special calibration of cable-suspended current meters is only useful for field measurements of velocities lower than 0,25 m/s. For measurements of higher velocities differences occurring by the manner of suspension are neglectible.

1. Problemstellung

Für die Wasserwirtschaft sind Abflußmessungen in fließenden Gewässern von großer Bedeutung. Dies gilt beispielsweise für die Wassermengenwirtschaft und die Bestimmung von Hochwasserabflüssen. In kleinerem Ausmaß erfolgt die Durchflußermittlung in Fließgewässern mittels Venturigerinnen, Meßwehren oder ähnlichen Einrichtungen. Im Regelfall wird der Durchfluß aus der Integration von Geschwindigkeitsmessungen über den Abflußquerschnitt berechnet. Für die Messung der Fließgeschwindigkeit gilt der hydrometrische Flügel nach wie vor als Stand der Technik.

Bei der Messung sind die hydrometrischen Flügel sowohl durch Seilabhängungen als auch an Stangen befestigt. Es stellen sich für den praktischen Einsatz somit folgende Fragen:

- Welchen Einfluß hat die Befestigungsart des Flügels auf die Messung der Fließgeschwindigkeit?
- Kann im Rahmen der Kalibrierung hydrometrischer Flügel ein Einfluß der Befestigungsart festgestellt werden? Wenn ja, wie ist dieser Einfluß zu quantifizieren?
- Ist für jede Befestigungsart, mit der ein hydrometrischer Flügel eingesetzt wird, eine eigene Kalibrierung erforderlich?

Zu diesem Thema stellt TEUBNER (1987) unter Hinweis auf SCHUPPE (1984) und DIETZ (1985) fest, daß die Unterschiede zwischen Stangen- und Seilflügelkalibrierung höchstens 1 %, selten auch 1,5 % betragen. Bei der Umrechnung der Prüfergebnisse von Stangenflügel auf Seilflügel können folgende Beziehungen, in Abhängigkeit vom Gewicht des Mittelstücks, empfohlen werden:

$$V_{50 \text{ kg}} = 1,004 \cdot v_{\text{Stange}} \quad (1)$$

$$V_{100 \text{ kg}} = 1,010 \cdot v_{\text{Stange}} \quad (\text{TEUBNER, 1987}).$$

In einer weiteren Arbeit (TEUBNER und WANDER, 1987) zum Thema Kalibrierung von Meßflügeln schreiben die Autoren:

"An die Kalibrieranstalten wird die Bitte herangetragen, die Beziehungen zwischen den Flügelgleichungen von Stangen- und Seilflügeln (mit verschiedenen Mittelstücken) detailliert aufzuzeigen und zu klären, ob und wie sich die Unsicherheit einer abgeleiteten Kalibrierung gegenüber einer individuellen Kalibrierung für jede Befestigungsart ändert."

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich schwerpunktmäßig mit dem Einfluß der Befestigungsart (Stange oder Seil) auf die Kalibrierung von hydrometrischen Flügeln.

Ermöglicht wurde diese Arbeit durch einen Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft (GZ. 46.200/05-IV/88). Der hydrographische Dienst des Landes Niederösterreich stellte für die Untersuchungen ein 50 kg Gewichtstück mit Zwischenstück und Leiteinrichtung zur Verfügung.

2. Methodik

2.1. Prüftechnik

Alle Messungen erfolgten im hydrometrischen Prüfkanal der Bundesanstalt für Wasserbauversuche und hydrometrische Prüfung in Wien.

Die Kalibrieranlage besteht aus folgenden Einrichtungen:

- Prüfkanal: Länge 40,65 m
 Breite 2,25 m
 Wassertiefe 1,80-2,00 m.

- Prüfwagen: thyristorgesteuerter Fremdantrieb, stufenlos regelbare konstante Geschwindigkeit im Bereich von 0,02 bis 3,30 m/s.

- Meßwerterfassung (System Fa. Schulze): Geschwindigkeit des Prüfwagens in mm/s, Meßzeit zwischen einer vorwählbaren Anzahl von Umdrehungsimpulsen in 1/1000 Sekunden.

Die Prüfung der hydrometrischen Flügel erfolgt nach einem festen Meßschema, bei dem die Anzahl der Umdrehungsimpulse in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung der Flügel-schau-fel (Impeller) sowie die Prüfwagengeschwindigkeiten vorgewählt werden. Aus dieser Vorwahl ergeben sich die Dauer der Meßfahrten und die Wartezeit für die Beruhigung des Wassers im Prüfkanal zwischen den einzelnen Fahrten.

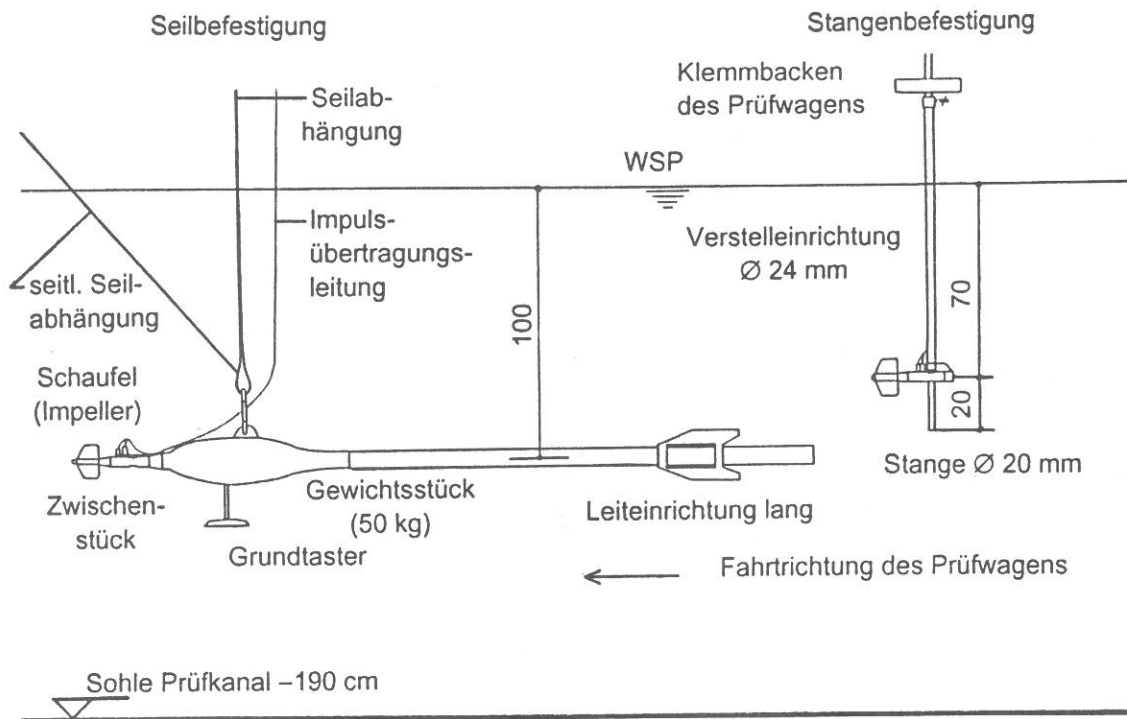


Abb. 1: Befestigung von Seilflügel und Stangenflügel für die Vergleichsprüfungen (schematische Darstellung)

Bei der Abhängung der Seilflügel kommt ein 50kg-Mittelstück mit Zwischenstück und Leiteinrichtung zum Einsatz. Damit ist bei allen Seilflügelprüfungen die gleiche Befestigungsart gegeben. Die Stangenflügel werden immer mit Hilfe der selben Stange befestigt um den Einfluß unterschiedlicher Befestigungsstangen bei der Prüfung auszuschließen. Die Befestigungen der hydro-metrischen Meßflügel für die durchgeführten Seil- und Stangen-

flügelprüfungen sind in Abb. 1 dargestellt. Die Abbildung 1 beschränkt sich im wesentlichen auf die Befestigungsteile unter dem Wasserspiegel.

2.2. Analyse der Meßdaten

Die Auswertung der Meßdaten ist, ebenso wie die Meßwerterfassung, schematisiert und wird mit einem speziellen, menügesteuerten Auswerteprogramm durchgeführt. Zur Anpassung von Ausgleichsgeraden an die Meßpunkte wird ein Gauß-Ausgleich mit zusätzlicher Optimieroutine verwendet, der alle möglichen Ausgleichsgeraden berücksichtigt. Die Festlegung der Bereiche für die einzelnen Prüfgeraden erfolgt im Auswerteprogramm und ist mittels graphischer Unterstützung variierbar, um eine möglichst gute Näherung der Prüfgeraden an die Meßpunkte zu erzielen.

2.2.1. Vergleich zu bestehenden Untersuchungen

Gleichung (1) gibt ein festes Verhältnis zwischen den Geschwindigkeiten von Seilflügeln und Stangenflügeln an. Die angegebene Verhältniszahl ist unabhängig von der Flügelgeometrie und wird über den gesamten Drehzahlbereich als gültig angesehen. In Gleichung (1) ist daher die Aussage enthalten, daß mit zunehmender Fließgeschwindigkeit die absoluten Differenzen zwischen Stangen- und Seilflügel zunehmen, die relative Differenz (der prozentuelle Fehler) bleibt dagegen konstant.

Um zu überprüfen, ob die Gleichung (1) auch für die Prüfmethodik an der Bundesanstalt Gültigkeit besitzt, wird folgende Vorgangsweise gewählt:

Die Meßwerte aus der Seilflügelprüfung werden in Relation zu den zugehörigen Ergebnissen der Stangenflügelprüfung gesetzt.

Für jeden Meßpunkt einer Seilflügelprüfung existiert ein Wertepaar, bestehend aus der Umdrehungszahl n_{Seil} [u/s] und der Geschwindigkeit v_{Seil} [m/s].

Unter Verwendung der zugehörigen Stangenflügelprüfgleichung können, mittels der Umdrehungszahlen n_{Seil} , die entsprechenden Geschwindigkeiten des Stangenflügels v_{Stange} ermittelt werden. Dies ergibt für jede Vergleichsprüfung über den Prüfbereich verteilte Wertepaare v_{Seil} (Meßwerte) und v_{Stange} (aus Prüfgleichung berechnet).

Mit den Wertepaaren $(v_{\text{Seil}}, v_{\text{Stange}})$ ist es nun möglich eine Regressionsanalyse durchzuführen. Die Steigung k der Regressionsgeraden (durch den Nullpunkt) ergibt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit des Seilflügels und Geschwindigkeit des Stangenflügels:

$$v_{\text{Seil}} = k \cdot v_{\text{Stange}} \quad (2)$$

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind dem Abschnitt 4.1 zu entnehmen.

2.2.2. Ergänzende Auswertemethodik

Der zweite Untersuchungsschritt hat eine detailliertere Analyse der Prüfgleichungen für Stangen- und Seilflügel zum Ziel. Es soll festgestellt werden, ob die Differenzen zwischen den beiden Prüfmethode von der Flügelgeometrie (geometrische Steigung) oder auch von der Drehzahl abhängig sind.

Die Prüfgleichungen für einen einzelnen Flügel können in Abhängigkeit von der Prüfmethode wie folgt dargestellt werden:

$$v_{i\text{Stange}} = a_i + b_i \cdot n = v_{\text{St}}(n) \quad (3)$$

$$v_{j\text{Seil}} = a_j + b_j \cdot n = v_{\text{S}}(n) \quad (4)$$

mit $i \geq 1$... Zähler für die Prüfgleichungen eines Stangenflügels

$j \geq 1$... Zähler für die Prüfgleichungen eines Seilflügels

a ... Ordinatenabschnitt der Prüfgeraden

b ... Steigung der Prüfgeraden.

Für Flügel mit gleicher geometrischer Steigung und daher vergleichbarer Drehzahl ist es möglich die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Stangen und Seilflügel zusammenzustellen.

$$\Delta v_f(n) = v_{f,St}(n) - v_{f,S}(n) \quad (5)$$

f ... Nummer von Flügeln mit gleicher geometrischer Steigung.

Für die Zusammenstellung der $\Delta v_f(n)$ werden die Prüfgleichungen in Richtung $n=0$ und in Richtung der größten vorkommenden Umdrehungszahl erweitert, um eine gleiche Bezugsbasis für alle Flügel zu erhalten. Die maximalen Umdrehungszahlen in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung sind in Tabelle 1 angegeben.

geometrische Steigung [m]	n [u/s]
0,125	25
0,250	15
0,325	10
0,500	7

Tabelle 1: Maximale Flügelumdrehungszahlen in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung

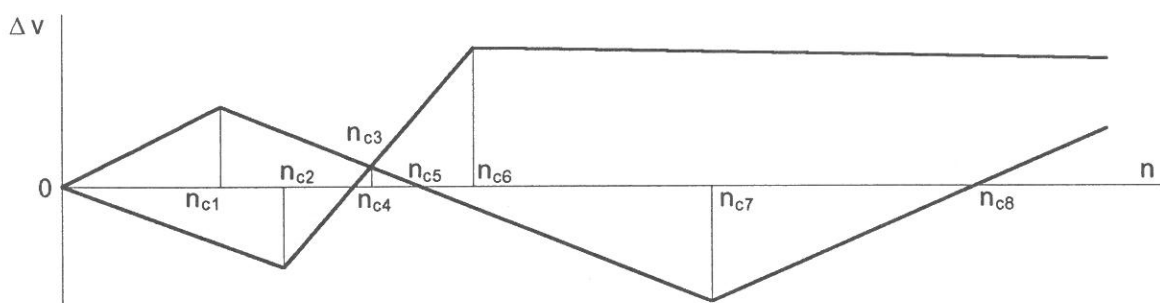


Abb. 2: Definition der charakteristischen Drehzahlen n_c (Beispiel für zwei Vergleichsprüfungen)

Die Berechnung der Δv_f erfolgt für charakteristische Umdrehungszahlen (n_c) das heißt eine der Differenzgleichungen weist entweder eine Nullstelle oder einen Knickpunkt auf (siehe schematische Darstellung in Abb. 2).

Zu jedem n_c ist es nun möglich aus den $\Delta v_f(n_c)$ eine mittlere Geschwindigkeitsdifferenz Δv_{nc} zu berechnen und diese mittleren Differenzen, die von der Umdrehungszahl abhängig sind, weiter zu analysieren. Dies erfolgt mittels Regressionsberechnungen

- (a) mit Ordinatenabschnitt
- (b) ohne Ordinatenabschnitt (durch den Nullpunkt)

und Angabe der Standardabweichung m der Δv_{nc} von der jeweiligen Regressionsgeraden.

Damit erhält man für jede Gruppe von geometrischen Steigungen eine Gleichung zur Beschreibung der mittleren Differenzen $\Delta v(n)$ in der Form

$$\Delta v(n) = a + b \cdot n$$

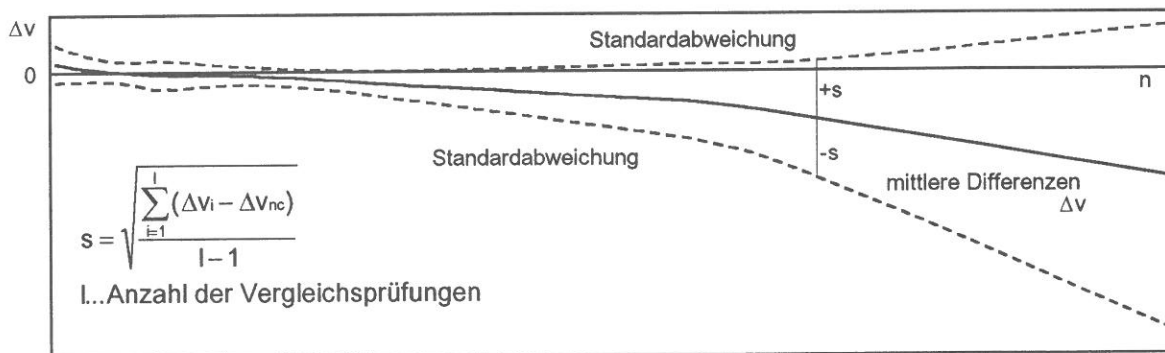


Abb. 3: Definition des Streubereiches um die Ausgleichsgerade zu den mittleren Differenzen zwischen Seil- und Stangenflügelprüfung

Zu jeder Gleichung $\Delta v(n)$ wird zusätzlich ein Streubereich um die mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen angegeben, der sich aus der Standardabweichung s aller Δv zu je einer charakteristischen Umdrehungszahl n_c ergibt (siehe Abb. 3).

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsmethodik sind im Abschnitt 4.2. zusammengestellt.

3. Untersuchungsumfang

Für die gegenständliche Untersuchung stehen die Daten von 40 hydrometrischen Flügeln zur Verfügung, die jeweils als Stangenflügel und als Seilflügel geprüft wurden. Je Prüfung wurden mindestens 20 Einzelmessungen durchgeführt (Ermittlung des Wertepaares Umdrehungszahl n und Prüfwagengeschwindigkeit v). Dies ergibt zusammengefaßt mehr als 1600 Einzelmessungen für die 80 Prüfungen. Die Anzahl der für die Vergleichsprüfungen zur Verfügung stehenden hydrometrischen Meßflügel, in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung, ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

geometrische Steigung [m]	hydrometrische Flügel [Anzahl]
0,125	11
0,250	19
0,325	2
0,500	8

Tabelle 2: Anzahl der untersuchten hydrometrischen Flügel in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung

4. Ergebnisse

Neben der (den) Prüfgleichung(en) wird bei jeder hydrometrischen Prüfung die Standardabweichung der Meßpunkte von der (den) Ausgleichsgerade(n) als mittlerer Fehler m angegeben. Die Mittelbildung über alle Standardabweichungen der 40 Vergleichsprüfungen ergeben folgende mittlere Fehler, getrennt nach Stangen- und Seilflügelprüfungen:

$$m_{\text{Stange}} = \pm 2,47 \text{ mm/s}$$

$$m_{\text{Seil}} = \pm 2,54 \text{ mm/s}$$

Die beiden mittleren Fehler sind damit praktisch gleich. Die Differenz von weniger als $1/10$ mm/s ist nur als numerische Differenz zu begründen. Ein Einfluß der Befestigungsmethode kann daraus nicht abgelesen werden.

4.1. Vergleich zu bestehenden Untersuchungen

TEUBNER (1987) gibt für den Umrechnungsfaktor k den Wert 1,004 zur Umrechnung der Stangenflügelprüfergebnisse auf die Geschwindigkeit des Seilflügels an (siehe Gleichung 1).

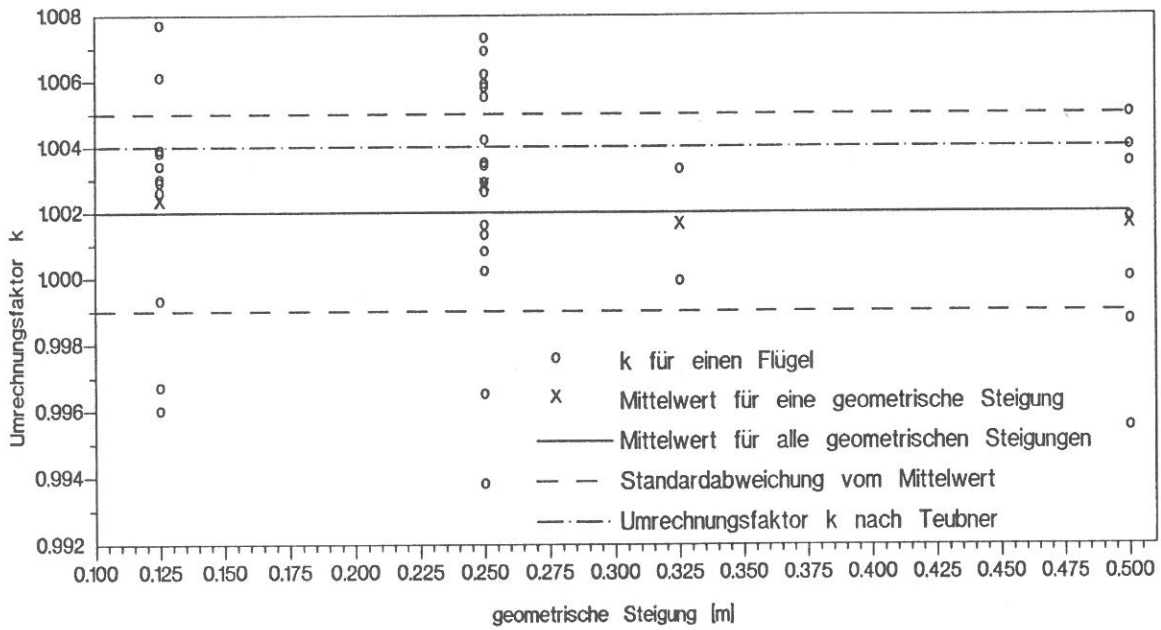


Abb. 4: Gegenüberstellung der ermittelten Umrechnungsfaktoren k in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung

Die Auswertung der 40 Vergleichsprüfungen ergibt den mittleren Umrechnungsfaktor $k = 1,002$ mit einer Standardabweichung von $m_k = \pm 0,003$. Die maximalen bzw. minimalen Umrechnungsfaktoren betragen 1,0077 und 0,9938. In der Abbildung 4 sind die Umrechnungsfaktoren aller Vergleichsprüfungen in Abhängigkeit von der geometrischen Flügelsteigung aufgetragen. Zusätzlich enthält die Abbildung 4 noch die Mittelwerte für die einzelnen Steigungen, den Umrechnungsfaktor aus TEUBNER (1987) und den, aus der vorliegenden Untersuchung erhaltenen mittleren Umrechnungsfaktor inklusive Standardabweichung.

Bei 32 Vergleichsprüfungen (80 % aller Vergleichsprüfungen) ist bei gleicher Umdrehungszahl eine größere Geschwindigkeit des Seilflügels gegenüber dem Stangenflügel festzustellen. Dies läßt sich wie folgt begründen:

- Der Seilflügel wird durch die flexible Halterung nicht so exakt horizontal in Fahrtrichtung des Prüfwagens geführt wie der Stangenflügel.
- Durch das Volumen des 50kg-Gewichtsstückes entsteht infolge der Wasserverdrängung eine Welle, die den Flügel geringfügig bremst (Einfluß von Quer- bzw. Gegenströmungen).

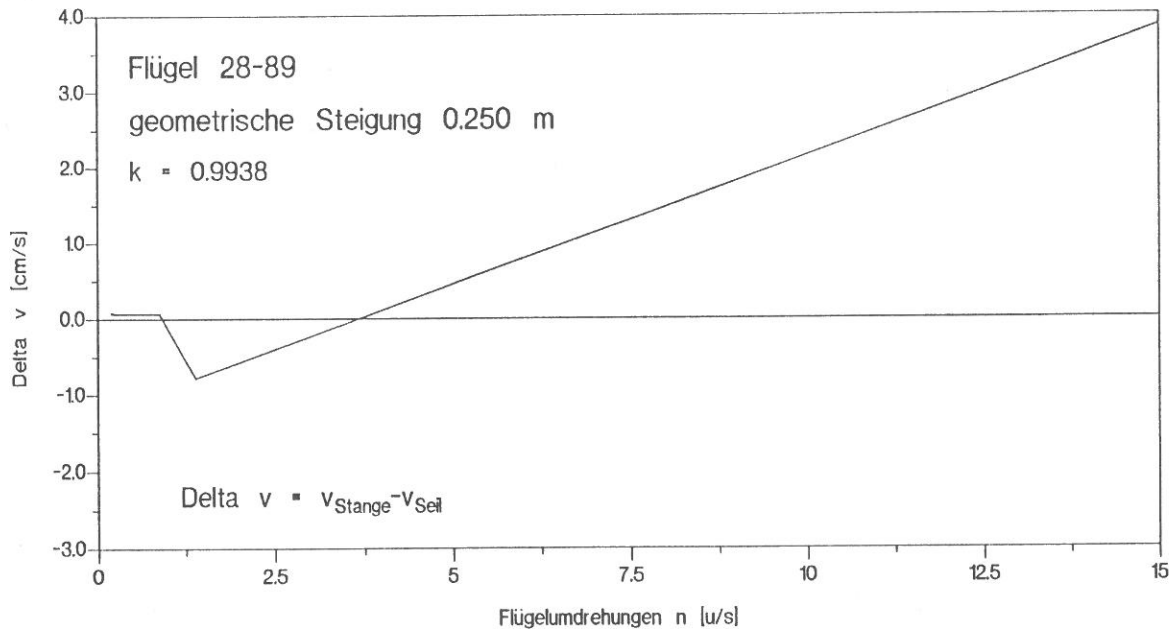


Abb. 5: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Stangen- und Seilflügelprüfung für den Flügel mit dem kleinsten Umrechnungsfaktor k aus der Untersuchungsreihe

Bei 8 Vergleichsprüfungen (20 % aller Vergleichsprüfungen) ergibt sich ein Umrechnungsfaktor kleiner als Eins. Das heißt, bei gleicher Umdrehungszahl erhält man beim Seilflügel eine kleinere Geschwindigkeit als beim Stangenflügel. Dies läßt darauf schließen, daß der Seilflügel bei der Prüfung ein besseres Drehverhalten zeigt als der Stangenflügel. In der Abb. 5 sind exemplarisch für den Flügel mit dem kleinsten Umrechnungsfaktor ($k=0,9938$) die Differenzen zwischen den beiden Flügelgleichungen dargestellt. Abb. 6 enthält die analoge Darstellung für den Flügel mit dem maximalen Umrechnungsfaktor ($k=1,0077$). Beide Abbildungen weisen für die Geschwindigkeitsdifferenzen den gleichen Maßstab auf.

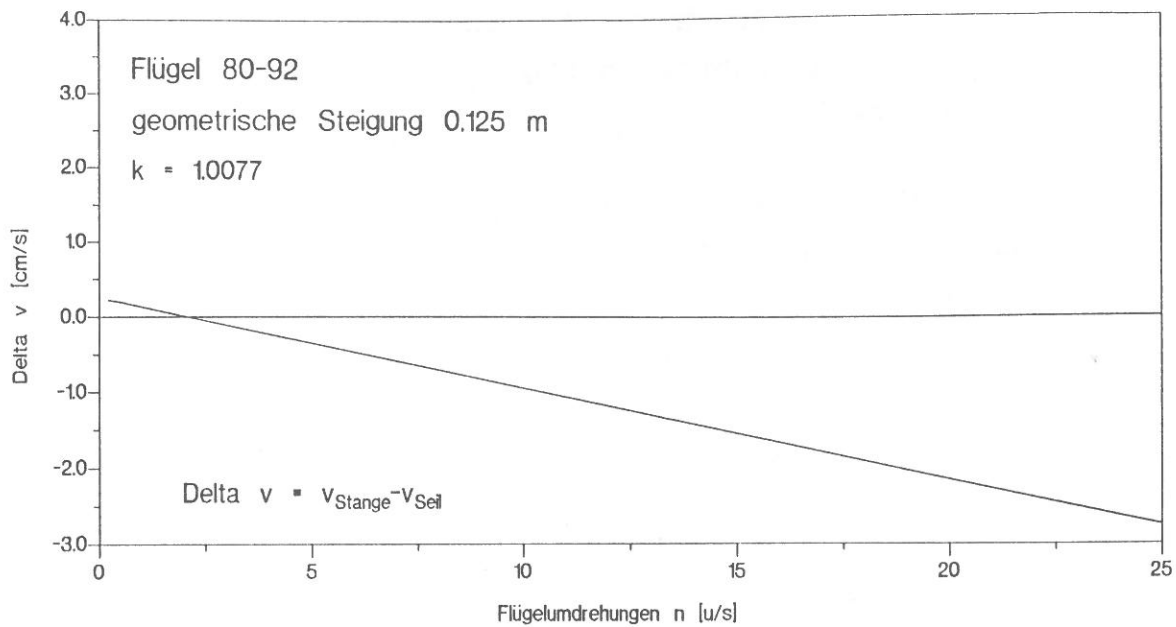


Abb. 6: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Stangen- und Seilflügelprüfung für den Flügel mit dem größten Umrechnungsfaktor k aus der Untersuchungsreihe

Zusammengefaßt weichen nach der hier gewählten Untersuchungsmethodik bei gleicher Umdrehungszahl ermittelte Geschwindigkeiten von Seilflügeln mit 50kg-Gewichtsstück im Mittel um -2 Promille von den Geschwindigkeiten der Stangenflügel ab. 67,5 % aller Vergleichsprüfungen ergeben Abweichungen zwischen +1 Promille und -5 Promille. Die beiden Extremwerte betragen -7,7 Promille bzw. +6,2 Promille.

4.2. Ergänzende Auswertungen

Ziel dieser, in Abschnitt 2.2.2. beschriebenen Methode ist eine detailliertere Analyse der vorhandenen Meßdaten.

Erster Schritt ist die Darstellung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Stangenflügel- und Seilflügelgleichung als lineare Funktion in Abhängigkeit von der Drehzahl

$$\Delta v = a + b \cdot n$$

mit dem mittleren Fehler m.

Die Ergebnisse der linearen Regressionen, getrennt in vier Gruppen mit den geometrischen Steigung 0,125 m, 0,250 m, 0,325 m und 0,500 m sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Weiters wird in Regressionen mit Ordinatenabschnitt und Regressionen durch den Nullpunkt unterschieden. Die mittleren Fehler m zeigen, daß mit Ausnahme der beiden Flügel mit geometrischer Steigung 0,325 m, die mittleren Differenzen als Funktion von der Drehzahl gut mittels linearer Beziehung angenähert werden können.

geometrische Steigung	Regression mit Ordinatenabschnitt			Regression durch Nullpunkt			Anzahl Flügel
	a	b	m	a	b	m	
[m]	[mm/s]	[mm/u]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/u]	[mm/s]	
0,125	-0,193	-0,345	$\pm 0,61$	0	-0,365	$\pm 0,63$	11
0,250	1,490	-0,988	$\pm 0,87$	0	-0,742	$\pm 1,44$	19
0,325	2,318	-2,631	$\pm 3,67$	0	-2,245	$\pm 3,87$	2
0,500	-0,038	-0,168	$\pm 0,62$	0	-0,181	$\pm 0,62$	8

Tabelle 3: Ergebnisse der linearen Regression über die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Stangen- und Seilflügelgleichung in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung

Die im folgenden beschriebenen Abb. 7 und 9 bis 11 bestehen aus jeweils zwei Teilen. Im oberen Teil sind für die untersuchten geometrischen Steigungen die in Tabelle 3 angegebenen Regressionsgeraden mit Ordinatenabschnitt und die mittleren $\Delta v(n)$ inklusive Standardabweichungen, dimensionsbehaftet in cm/s dargestellt. Der zweite Teil der Abbildungen enthält die, auf die Geschwindigkeit der Stangenflügel bezogenen prozentuellen mittleren Differenzen mit zugehörigen Standardabweichungen.

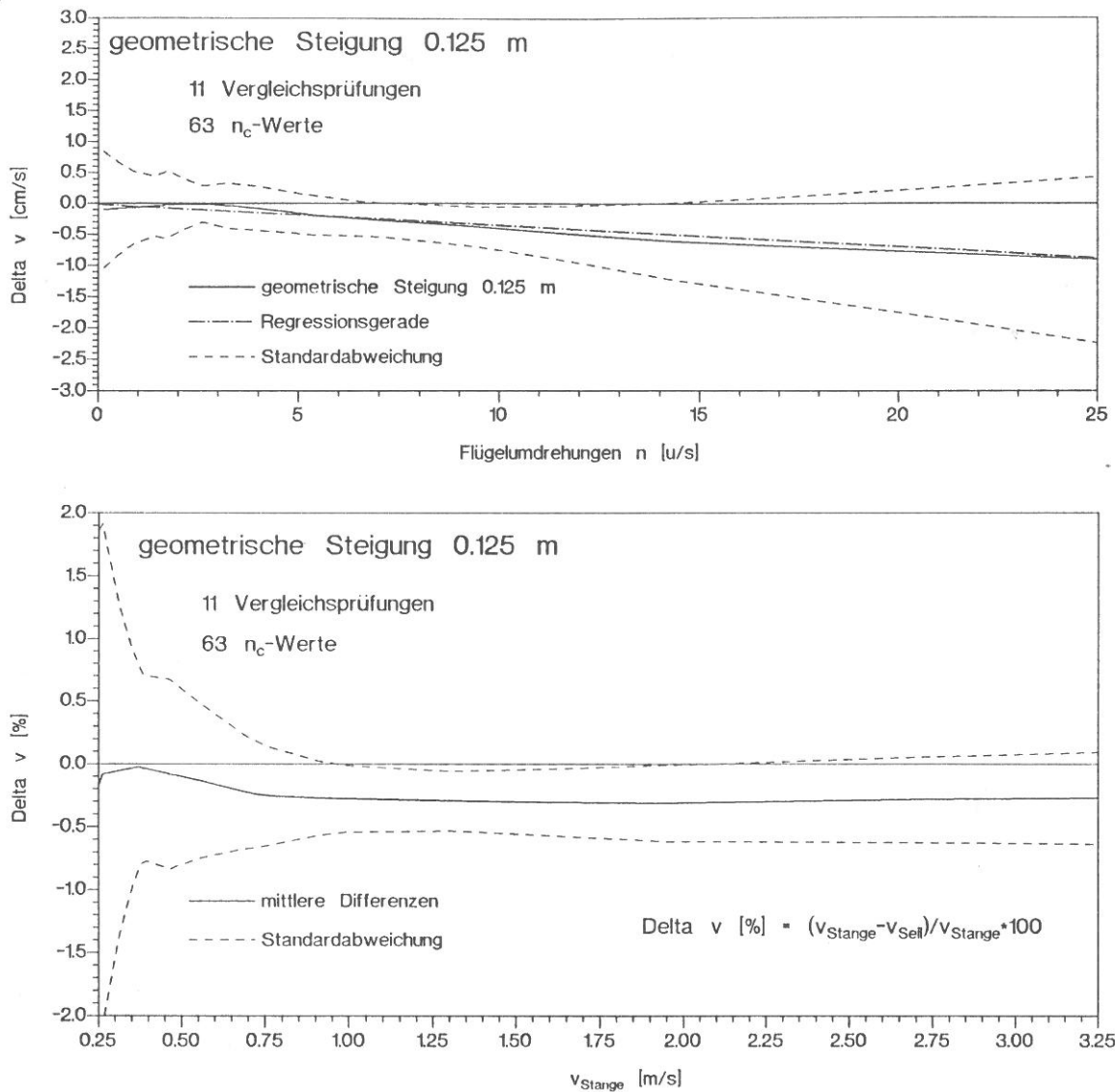


Abb. 7: Differenzen zwischen Stangen- und Seilflügelprüfungen für die geometrische Steigung 0,125 m

Abb. 7 zeigt die mittleren Differenzen für die 11 Vergleichsprüfungen der geometrischen Steigung von 0,125 m. Die mittleren Differenzen sind durchwegs kleiner oder gleich Null mit dem Minimum im Bereich von n=2-3. Ab etwa n=3 bis n=7 weist die Standardabweichung vom Mittelwert die geringsten Werte auf. Die größeren Abweichungen in Richtung n=0 lassen sich durch den unterschiedlichen Drehbeginn (Anlaufwiderstand) der einzelnen Flügel in Kombination mit der Lage der Flügelachse zur Fahrtrichtung des Prüfwagens erklären. Ab etwa n=3 nehmen die Diffe-

renzen mit der Drehzahl in etwa linear zu. Die Standardabweichung der mittleren Differenzen nimmt ebenfalls zu. Gründe dafür sind:

- Störungen infolge Makroturbulenz, verursacht durch die begrenzte Kanalgeometrie bei hohen Prüfgeschwindigkeiten (ca. 3 m/s).
- Im Bereich kleiner Umdrehungszahlen liegen mehr Meßpunkte vor als bei hohen Umdrehungszahlen. Dadurch liegt beim Ausgleich der Schwerpunkt auf den niedrigeren Fließgeschwindigkeiten. Die Meßpunkte im hohen Geschwindigkeitsbereich können von der Prüfgeraden etwas weiter abweichen.

Die prozentuellen Differenzen betragen im Mittel maximal $-0,3\%$ und sind ab ca. 0,7 m/s von der Fließgeschwindigkeit weitgehend unabhängig. Die starke Zunahme der Standardabweichung der prozentuellen Differenzen von ca. $\pm 0,7\%$ bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,5 m/s auf ca. $\pm 2\%$ bei 0,25 m/s ist, wie bereits erwähnt hauptsächlich auf Anlaufwiderstände und die Lage des hydrometrischen Flügels in der Strömung zurückzuführen.

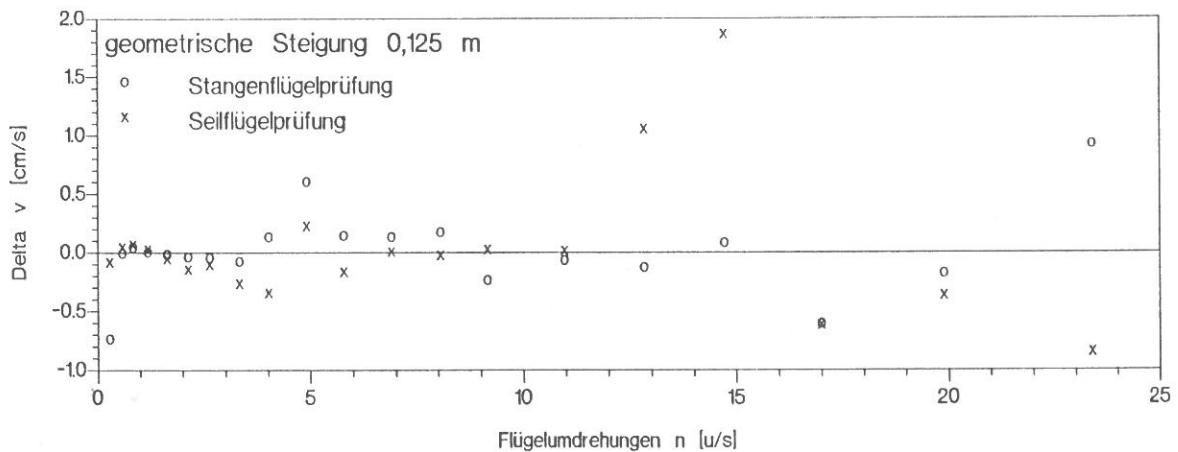


Abb. 8: Beispiel für die Abweichung der Meßwerte einer Vergleichsprüfung von den Prüfgleichungen

Zum Vergleich der Differenzen zwischen Seil- und Stangenflügelprüfung sowie der Differenzen zwischen Prüfgleichung und Meßwerten sind in Abb. 8 für einen Flügel die Abweichungen der

Meßwerte von den Prüfgleichungen dargestellt. Es ist gut zu erkennen, daß sowohl bei der Stangenflügelprüfung als auch bei der Seilflügelprüfung die Meßwerte bei höheren Fahrgeschwindigkeiten des Prüfwagens weiter um die Ausgleichsgeraden streuen als bei niederen Geschwindigkeiten. Dies führt mit zunehmender Geschwindigkeit zur Aufweitung des Streubereichs.

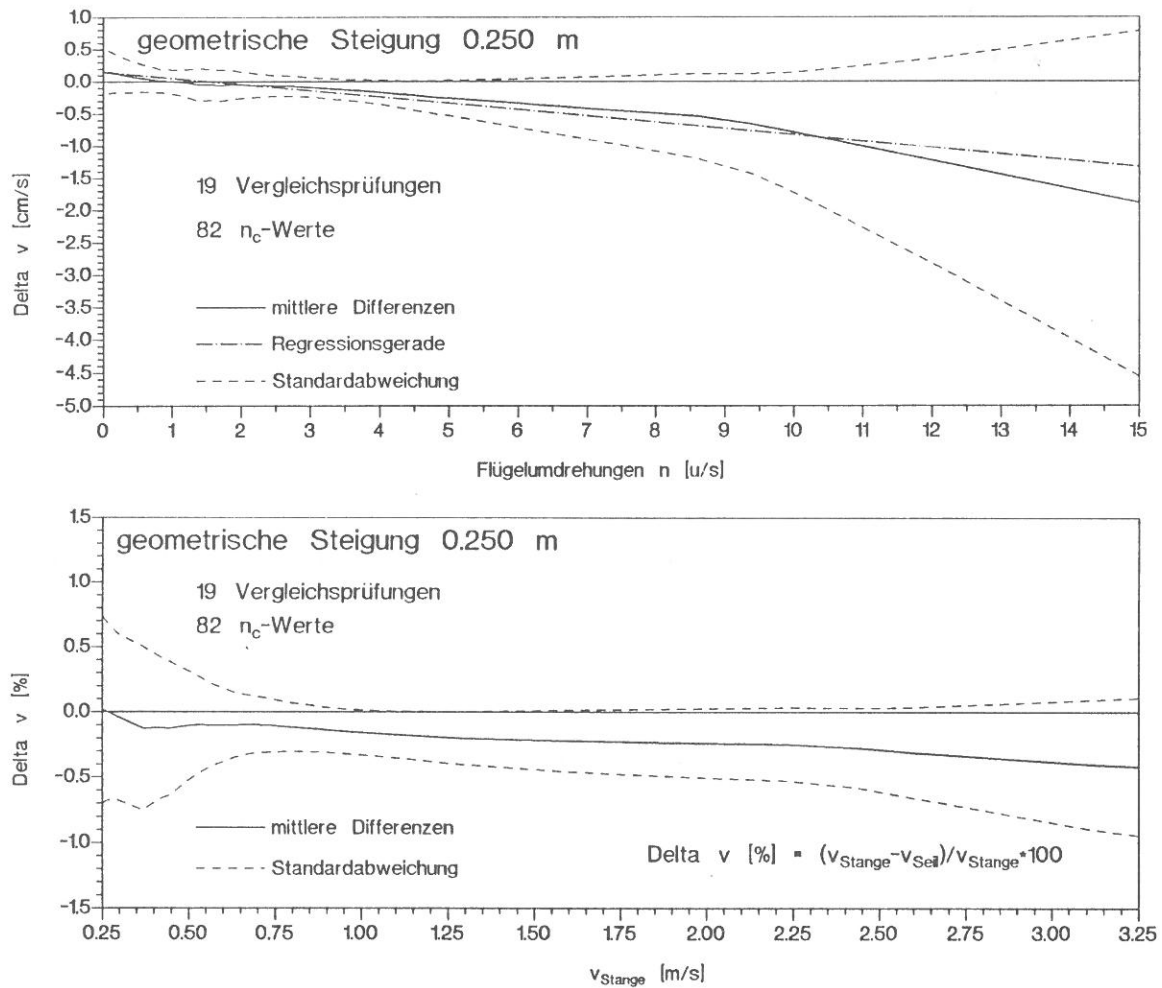


Abb. 9: Differenzen zwischen Stangen- und Seilflügelprüfungen für die geometrische Steigung 0,250 m

Die der Abb. 9 zu entnehmenden Differenzen für die geometrische Steigung 0,250 m zeigt von n=1,5 bis 9 ein ähnliches Bild wie Abb. 7. Für n<1,5 werden die mittleren Differenzen positiv. Ab etwa n=9 ist eine steilere Zunahme der Differenzen festzustellen, auch die Standardabweichung nimmt stärker zu. Der lineare Ausgleich über die mittleren Differenzen ist nur geringfügig schlechter als bei den Flügeln mit einer geometrischer Steigung

von 0,125 m ($m=\pm 0,87$ mm/s gegenüber $m=\pm 0,61$ mm/s). Die mittleren prozentuellen Differenzen betragen durchwegs weniger als -0,5 %, bis 2,5 m/s weniger als -0,3 %. Es ist eine geringfügige Zunahme der mittleren prozentuellen Differenzen mit der Geschwindigkeit feststellbar.

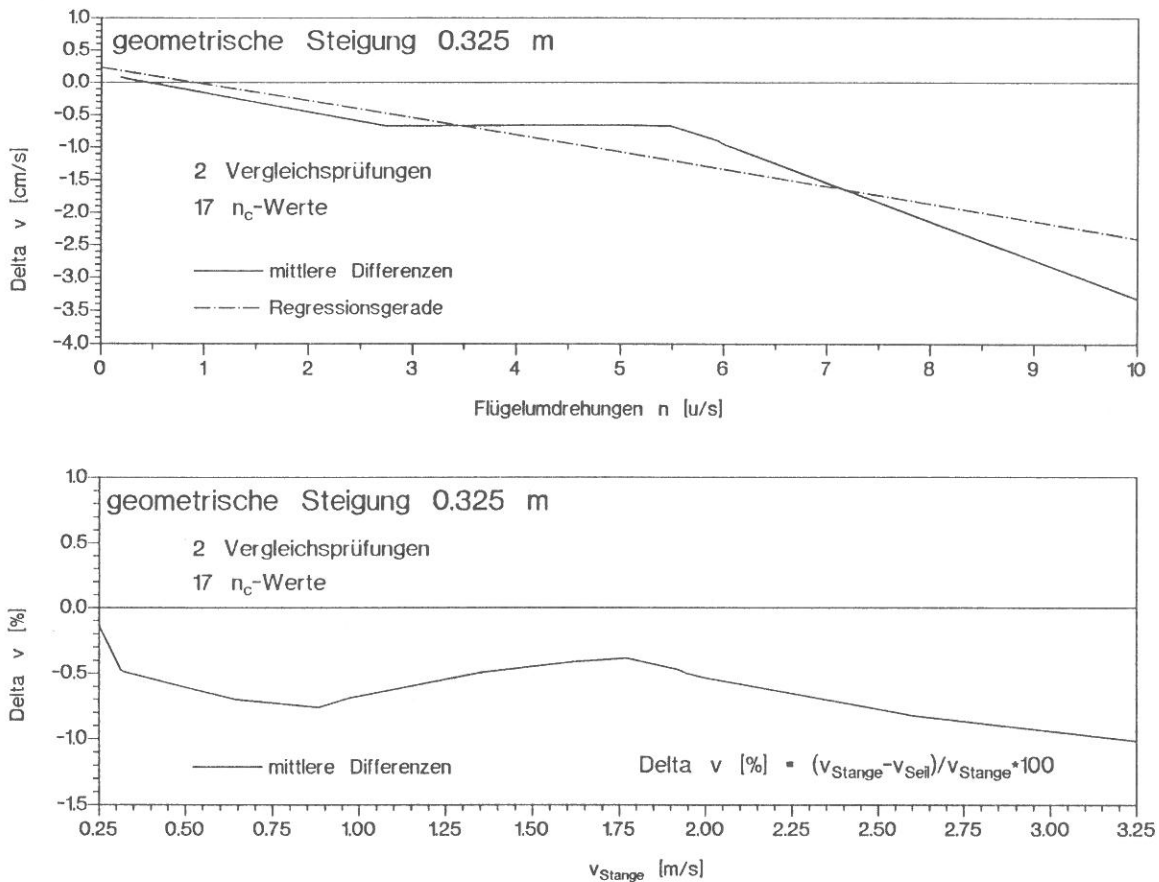


Abb. 10: Differenzen zwischen Stangen- und Seilflügelprüfungen für die geometrische Steigung 0,325 m

Für die geometrische Steigung von 0,325 m stehen nur zwei Vergleichsprüfungen zur Verfügung. Aus diesem Grund ist in der Abb. 10 auch keine Standardabweichung zu den mittleren Differenzen angegeben. Flügel dieser Gruppe stehen in Österreich nur bei wenigen Anwendern in Gebrauch. Die absoluten Differenzen nehmen mit zunehmender Drehzahl gleichfalls zu. Das Bild mit den prozentuellen Differenzen zeigt, daß diese bis zu -1,1 % betragen.

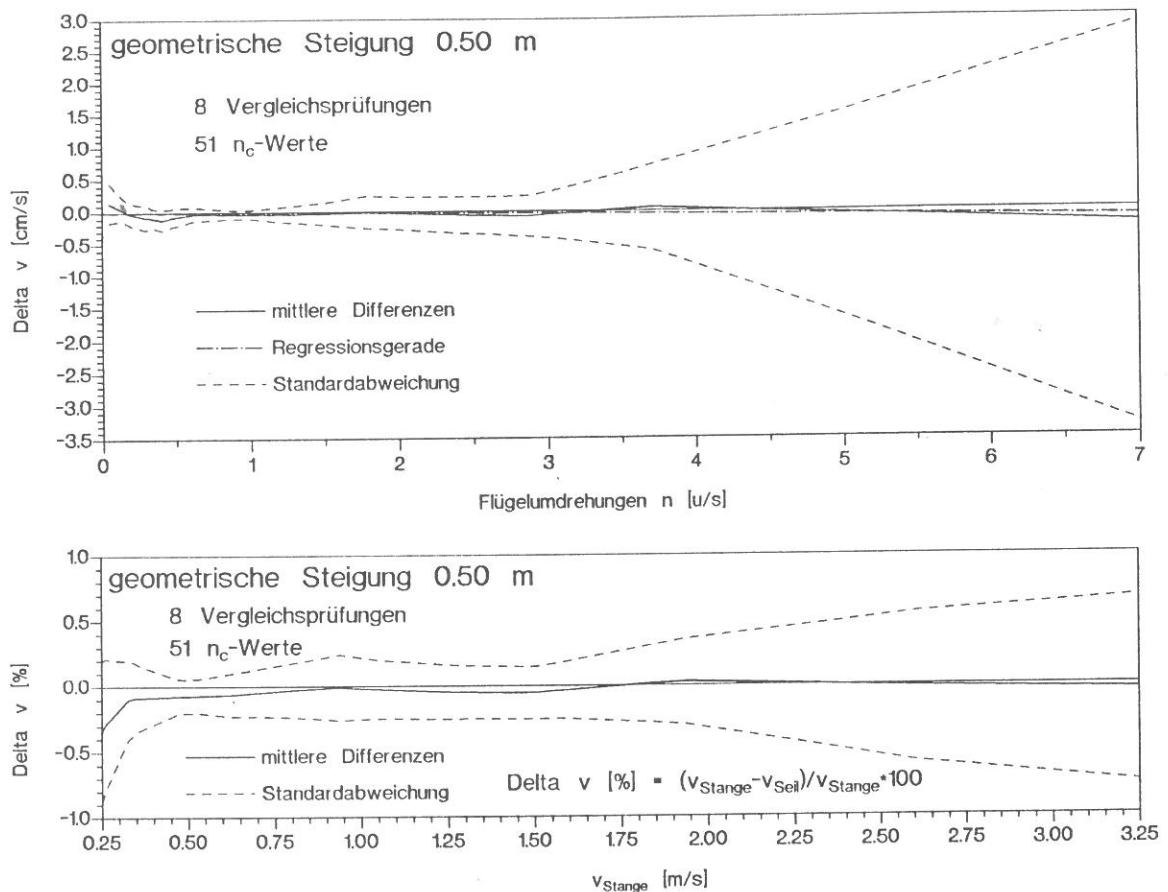


Abb. 11: Differenzen zwischen Stangen- und Seilflügelprüfungen für die geometrische Steigung 0,500 m

Die geringsten mittleren Differenzen zeigt die Gruppe der hydrometrischen Flügel mit einer Steigung von 0,500 m (siehe Abb. 11). Nur bei Fließgeschwindigkeiten unter 0,5 m/s betragen die mittleren Differenzen mehr als -0,1 %. Dagegen ergeben sich bei großen Fließgeschwindigkeiten die größten Standardabweichungen im Vergleich aller vier Gruppen. Beispielsweise für $n=7,0$ bzw. ca. 3,5 m/s ergibt sich eine Standardabweichung von $s=\pm 3,10$ cm/s bzw. ca. $\pm 0,8$ %.

Wenn man die Untersuchungsergebnisse der vier Gruppen vergleicht, erscheint es gerechtfertigt, alle Flügel zu einer Gruppe zusammenzufassen. Um für die dimensionsbehaftete Darstellung der $\Delta v(n)$ eine einheitliche Bezugsbasis zu schaffen ist es erforderlich, die Umdrehungszahlen im Verhältnis der geometrischen Steigungen zu dehnen. Damit vergleicht man in

etwa gleiche Geschwindigkeiten. Bei Verwendung der Steigung 0,125 m als Bezugsbasis ergibt sich damit, beispielsweise für die hydrometrischen Flügel mit einer Steigung von 0,250 m, ein Umrechnungsfaktor von $0,250/0,125=2$. Für die Flügel mit geometrischen Steigungen 0,325 m und 0,50 m betragen die Umrechnungsfaktoren 2,6 bzw. 4. Anschließend werden die $\Delta v(n)$ der einzelnen Flügel, die für unterschiedliche Umdrehungszahlen vorliegen, mittels linearer Abbildung auf gemeinsame Flügelumdrehungszahlen übergeführt. Für die Darstellung der Geschwindigkeitsdifferenzen in Prozent, bezogen auf die Stangenflügelgeschwindigkeit werden ebenfalls alle Differenzen mittels linearer Abbildung auf eine einheitliche x-Achse übergeführt.

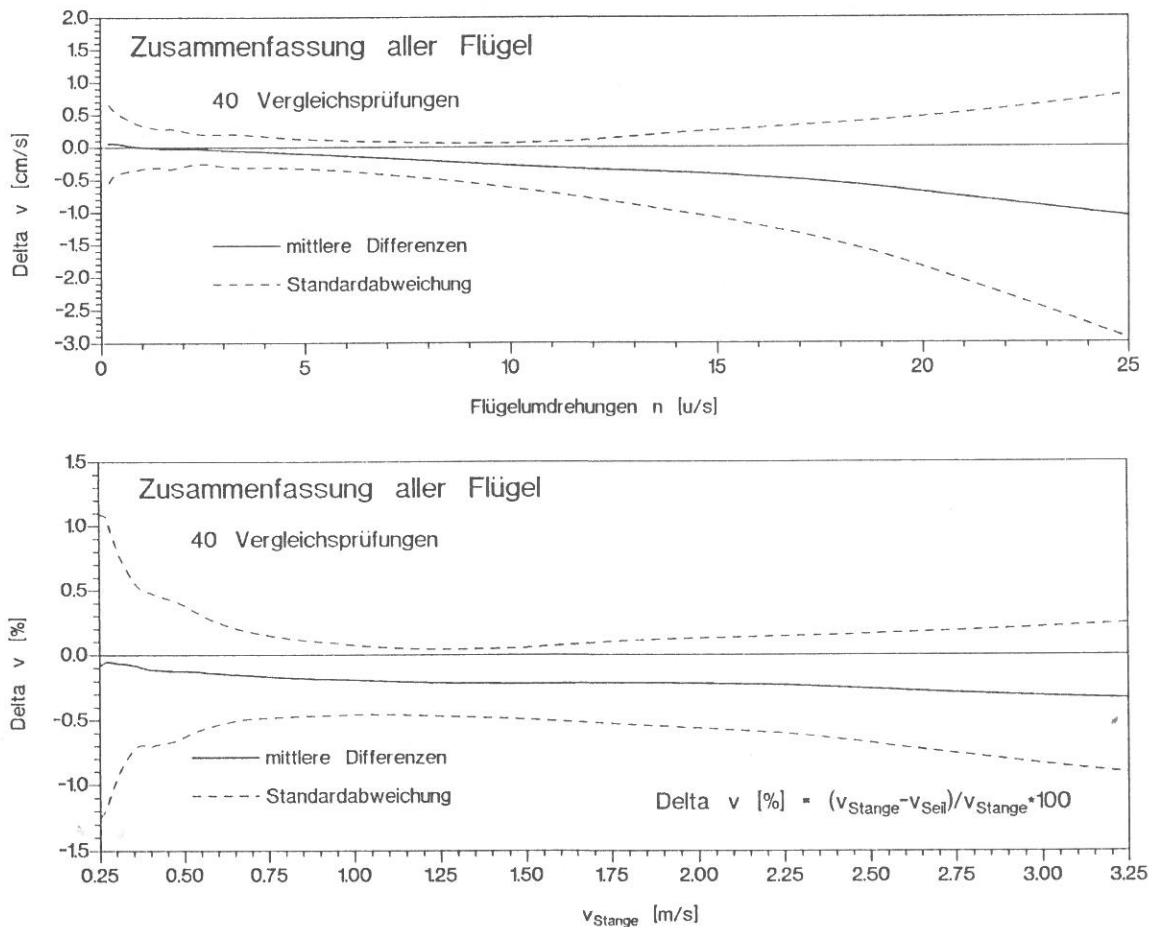


Abb. 12: Regressionsgeraden durch den Nullpunkt mit gedehnten Umdrehungszahlen für die vier untersuchten Flügelgruppen

Abb. 12 enthält im oberen Teil die Darstellung der dimensionsbehafteten $\Delta v(n)$ und im unteren Teil die prozentuellen Differenzen für alle 40 Vergleichsprüfungen. Die mittleren Differenzen nehmen mit zunehmender Umdrehungszahl in etwa linear zu (von +1 mm/s auf -11 mm/s, im Mittel -4 mm/s). Das Streuband zeigt ein ähnliches Bild, wie bei der Analyse der einzelnen Flügel in Abhängigkeit von der geometrischen Steigung. Im Bereich von etwa $n=2$ bis 8 bleibt der Streubereich unter $\pm 2,5$ mm/s und weitgehend konstant. Unterhalb von $n=2$ kommt es durch die Anlaufwiderstände der einzelnen Flügel zu einer Verbreiterung des Streubandes. Die Zunahme der Streuung über $n=8$ dürfte auf Störungen infolge der Makroturbulenz im Prüfkanal zurückzuführen sein, die mit zunehmender Prüfungsgeschwindigkeit immer stärker ausgeprägt ist.

Aus dem Bild der prozentuellen Differenzen ist abzulesen, daß die mittleren Differenzen von ca. -1 Promille bei 0,25 m/s auf ca. -3,4 Promille bei 3,25 m/s zunehmen. Im Mittel betragen die Differenzen -2 Promille und bestätigen somit das Ergebnis der ersten Untersuchung, die ebenfalls eine relative Differenz von -2 Promille zwischen Stangenflügel und Seilflügel ergibt.

Wenn man die mittleren prozentuellen Differenzen mittels Regressionsgerade annähert erhält man folgende lineare Beziehung:

$$\Delta v [\%] = -0,0667 - 0,0832 \cdot v_{St} \quad (6)$$

Aus Gleichung (6) erhält man die mittlere relative Differenz von -2 Promille für $v_{St}=1,60$ m/s.

Mit Berücksichtigung der Beziehung

$$v [\%] = \frac{v_{St} - v_S}{v_{St}} \cdot 100$$

folgt für die Umrechnung der Geschwindigkeit des Stangenflügels auf die Geschwindigkeit des Seilflügels

$$v_S = v_{St} \cdot \left(1 + \frac{0,0667 + 0,0832 \cdot v_{St}}{100} \right) \quad (7)$$

Der Klammerausdruck entspricht im Prinzip dem Umrechnungsfaktor k der ersten Untersuchung, ist aber nicht konstant, sondern von der Geschwindigkeit abhängig. Die obige Gleichung (7) ergibt bei $v_{St}=0,2500$ m/s $v_S=0,2502$ m/s (bzw. $k=1,0009$), also praktisch keine Veränderung. Bei $v_{St}=3,250$ m/s erhält man $v_S=3,261$ m/s (11 mm/s Differenz) bzw. $k=1,0034$.

Die mittleren Differenzen zwischen Stangenflügel und Seilflügel sind so klein, daß mit Berücksichtigung des Streubereiches eine Umrechnung der Stangenflügelprüfergebnisse auf Seilflügelgeschwindigkeiten für die Praxis nicht sinnvoll erscheint.

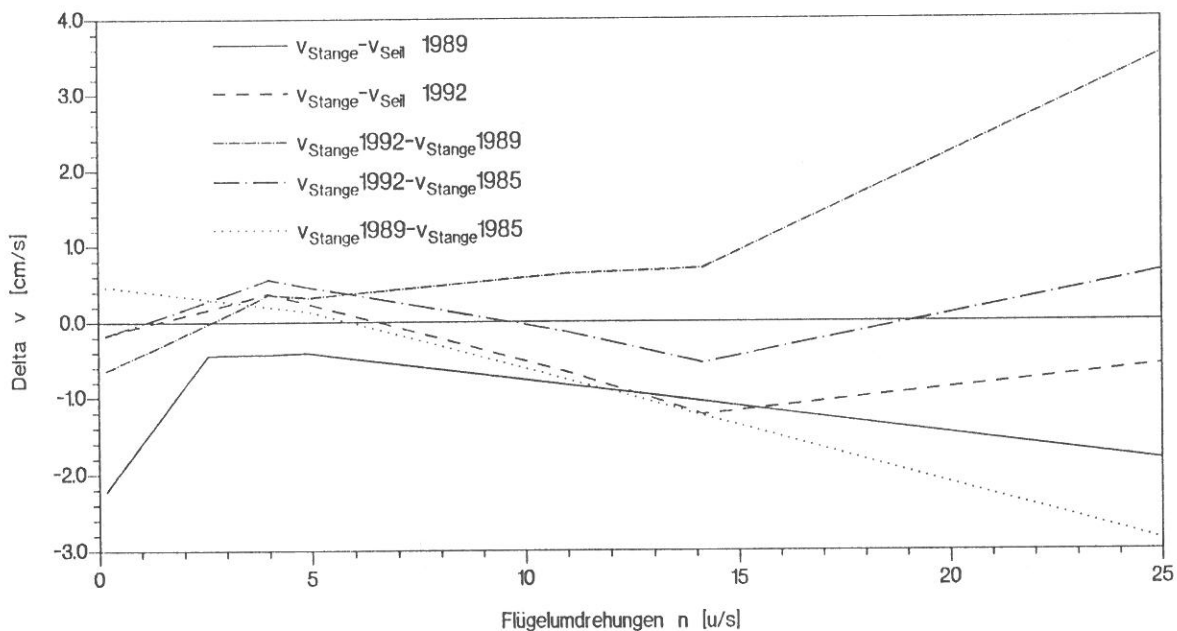


Abb. 13: Vergleich von 5 Prüfungen eines hydrometrischen Flügels

4.3. Mehrfache Prüfung eines hydrometrischen Flügels

Im Zuge der 40 Vergleichsprüfungen konnte ein Flügel mit einer geometrischen Steigung von 0,125 m im Abstand von 3 Jahren (1989 und 1992) zweimal sowohl als Stangen- als auch als Seilflügel geprüft werden. Weiters liegt eine Stangenflügelprüfung dieses Gerätes vor, die gegenüber der ersten Vergleichsprüfung weitere 4 Jahre (1985) zurückliegt. Die Differenzen zwischen

den Prüfgleichungen der fünf Einzelprüfungen sind der Abb. 13 zu entnehmen.

Abgesehen von der großen Differenz zwischen Stangen- und Seilflügelprüfung 1989 im Bereich von $n=0$ bis 2 u/s betragen die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Prüfungen bis $n=12$ u/s durchwegs weniger als 1 cm/s. Bei Umdrehungszahlen ab ca. $n=12$ zeigen die Vergleiche zwischen den Stangenflügelprüfungen 1985/89 und 1989/92 die größten Differenzen (max. -2,9 cm/s bzw. +3,5 cm/s). Der übergreifende Vergleich zwischen 1985 und 1992 zeigt dagegen wesentlich geringere Differenzen (max. 6 mm/s).

5. Schlußfolgerungen

Im Vergleich zur Arbeit von TEUBNER (1987) ergibt sich aus der vorliegenden Untersuchung für die Beziehung zwischen Geschwindigkeit Stangenflügel und Geschwindigkeit Seilflügel ein kleinerer Umrechnungsfaktor k

$$v_{50 \text{ kg}} = 1,002 \cdot v_{\text{Stange}} \text{ (eigene Untersuchung)}$$

$$v_{50 \text{ kg}} = 1,004 \cdot v_{\text{Stange}} \text{ (TEUBNER, 1987)}$$

Wobei der Faktor 1,002 als Mittelwert über 40 Vergleichsprüfungen anzusehen ist und eine Standardabweichung von $\pm 0,003$ aufweist. Damit liegt der von TEUBNER (1987) angegebene Umrechnungsfaktor 1,004 innerhalb des Streubereichs der vorliegenden Untersuchung ($0,999 \leq k \leq 1,005$).

Die detailliertere Auswertung der vorhandenen Meßdaten bestätigt die Ergebnisse der ersten Auswertung. Zusätzlich ist ersichtlich, daß die Differenzen zwischen Stangen- und Seilflügelprüfung bei kleinen Fließgeschwindigkeiten relativ groß werden können (über 2 % bei Fließgeschwindigkeiten unter 0,25 m/s). Bei großen Fließgeschwindigkeiten liegen die Fehler in wenigen Fällen zwischen 1 und 1,5 %, in der Regel unter 1 %. Dieses Ergebnis stimmt mit den Untersuchungen von TEUBNER ebenfalls gut überein. Eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit zeigt

zwar im Mittel nur eine geringe Zunahme der prozentuellen Differenzen, der sich aufweitende Streubereich weist allerdings für die einzelnen Prüfungen auf eine stärkere Zunahme der Differenzen hin.

Aufgrund der hier gewonnenen Erkenntnisse ist eine getrennte Prüfung von hydrometrischen Flügeln als Stangenflügel und als Seilflügel im allgemeinen als nicht notwendig anzusehen. Auch eine rechnerische Korrektur der Ergebnisse von Seilflügelmessungen bringt keine signifikante Erhöhung der Genauigkeit der Meßergebnisse. Eine Ausnahme bildet der Einsatz von Seilflügeln bei geringen Fließgeschwindigkeiten (unter etwa 0,25 m/s), hier zeigte sich in der Untersuchung, daß Differenzen von mehr als 1 % durchaus möglich sind. In diesen Fällen ist der Flügel aber unbedingt mit jenem Gewichtsstück und jener Leiteinrichtung zu prüfen, die auch im praktischen Meßeinsatz Verwendung finden, da Gewichtsstück und Leiteinrichtung die Lage des Flügels im Wasser entscheidend beeinflussen.

Der Vergleich von fünf Prüfungen eines hydrometrischen Flügels, der in einem Zeitraum von acht Jahren zweimal als Seilflügel und dreimal als Stangenflügel geprüft wurde zeigt, daß die Differenzen zwischen zwei Stangenflügelprüfungen in Zeitabständen von vier bzw. drei Jahren größere Differenzen ergeben können als eine Vergleichsprüfung zwischen Stangenflügel und Seilflügel. Dies gibt den Hinweis, daß kürzere Prüfintervalle die Zuverlässigkeit der Meßergebnisse stark erhöhen, da selbst kleine Veränderungen des Drehverhaltens des hydrometrischen Flügels sofort erkannt werden und über eine aktualisierte Prüfungsgleichung in die Meßergebnisse einfließen.

In diesem Zusammenhang stellt das Handbuch für die Abflußmengenmessung der Schweizerischen Landeshydrologie (1982) folgende Forderungen für zuverlässige Meßergebnisse auf:

- Jede Messung ist mit zwei verschiedenen Flügeln durchzuführen. Damit sind Fehlmessungen rasch zu erkennen.

- Jeder Flügel wird vor Gebrauch kontrolliert und nach Ende der Messung gereinigt und nochmals kontrolliert, da geringfügige Verschmutzung der Lager oder geringste Beschädigungen des Flügels bereits zu beträchtlichen Fehlern in der Geschwindigkeitsmessung führen können.
- Jeder Flügel ist bei geringstem Verdacht auf Veränderungen, spätestens aber nach 20 bis 25 Messungen neu zu prüfen.

Abschließend sind die am Beginn genannten Fragen wie folgt zu beantworten:

Es konnte bei der Kalibrierung von hydrometrischen Flügeln ein Einfluß der Befestigungsart (Stange oder 50 kg Gewichtsstück) festgestellt werden, der für den praktischen Meßeinsatz von Seilflügeln bei hohen Fließgeschwindigkeiten allerdings von vernachlässigbarer Größe ist. Eine eigene Kalibrierung der hydrometrischen Flügel in Abhängigkeit von den hier untersuchten Befestigungsarten ist nur in Ausnahmefällen erforderlich. Eine sorgfältige Stangenflügelprüfung in Zusammenhang mit einer sorgfältig durchgeführten Messung mittels Seilflügel am Gewässer liefert in der Regel zuverlässige Meßdaten für die Wassermengenwirtschaft.

6. Literatur

- /1/ Handbuch für die Abflussmengenmessung (1982): Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie, Mitteilung Nr. 4, Bern 1982.
- /2/ **Teubner, W.** (1987): Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung - Ergebnisse eines Ringversuchs. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes. Bericht der KHR Nr. I-6.
- /3/ **Teubner, W. und Wander, K.** (1987): Ein Ringversuch zur Kalibrierung hydrometrischer Flügel. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 31, 1987, H. 2/3, S.68-73.

7. Formelzeichen und Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	$L \cdot T^{-1}$	Ordinatenabschnitt einer Prüf- bzw. Regressionsgeraden
b	L	Steigung einer Prüf- bzw. Regressionsgeraden
k	1	Umrechnungsfaktor Fließgeschwindigkeit Stangenflügel auf Fließgeschwindigkeit Seilflügel
m	$L \cdot T^{-1}$	mittlerer Fehler (Standardabweichung) der Meßwerte von den Prüfgleichungen
m_k	$L \cdot T^{-1}$	mittlerer Fehler (Standardabweichung) der Umrechnungsfaktoren k
n	T^{-1}	Umdrehungszahl des hydrometrischen Flügels
n_c	T^{-1}	charakteristische Umdrehungszahl
s	$L \cdot T^{-1}$	Standardabweichung der Geschwindigkeitsdifferenzen
$v_{50 \text{ kg}}$	$L \cdot T^{-1}$	Geschwindigkeit bei Seilflügelabhängung mit 50 kg Gewichtsstück
$v_{100 \text{ kg}}$	$L \cdot T^{-1}$	Geschwindigkeit bei Seilflügelabhängung mit 100 kg Gewichtsstück
v_{Seil}, v_s	$L \cdot T^{-1}$	Geschwindigkeit bei Seilflügelabhängung
v_{Stange}, v_s	$L \cdot T^{-1}$	Geschwindigkeit bei Stangenflügelbefestigung
t		
Δv	$L \cdot T^{-1}$	Geschwindigkeit Seilflügel minus Geschwindigkeit Stangenflügel

Anschrift der Verfasser: Dipl.Ing.Dr. M. HENGL und G. GROSZSCHÄDL

Bundesanstalt für Wasserbauversuche
und hydrometrische Prüfung
Severingasse 7
A-1090 WIEN