

HYDRAULISCHE KRITERIEN ZUR AUSLEGUNG VON MESSSTELLEN

Helmut Kobus

INHALT

1. Einführung
 2. Wahl des Standorts
 - 2.1 Flußlängsschnitt
 - 2.2 Flußquerschnitt
 3. Gestaltung der Meßstelle
 - 3.1 Elemente der Meßstelle
 - 3.2 Meßbereich und Bauwerkstyp
 - 3.3 Gestaltung des Zulaufbereichs
 - 3.4 Kolksicherung
 4. Störeinflüsse
 5. Kalibriermöglichkeiten
- Literaturhinweise

1. EINFÜHRUNG

Für die Standortwahl von Meßstellen sind zunächst übergeordnete hydrologische und wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte maßgeblich. Durch die Konzeption eines Meßstellennetzes wird der jeweilige Gewässerabschnitt festgelegt, in dessen Bereich eine Abflußbestimmung erforderlich ist. Innerhalb dieses Bereichs ist nun der Standort der Meßstelle und deren Gestaltung festzulegen, wobei vielerlei Gesichtspunkte und nicht zuletzt auch hydraulische Kriterien berücksichtigt werden müssen. Hierbei ist es oft nicht leicht, bei Berücksichtigung des Hochwasserschutzes, des Landschaftschutzes, bestehender Wasserrechte, der Gewässerökologie und des Wasser- und Freizeitsports mit vertretbarem Aufwand zu einem einfachen, wartungsarmen Bauwerk zu kommen, das der gestellten Meßaufgabe gerecht wird.

Aus dieser Aufzählung wird deutlich, daß bei der Meßstellenauswahl eine Vielzahl von Überlegungen nicht-meßtechnischer Art mit berücksichtigt werden muß, so daß für hydraulische

Gesichtspunkte üblicherweise nur ein sehr kleiner Spielraum verbleibt. Andererseits ist es für eine ordnungsgemäße Funktion der Meßstelle unerlässlich, einige Grundanforderungen der hydraulischen Gestaltung zu beachten, da anderenfalls das Bauwerk unter Umständen seiner meßtechnischen Funktion nicht hinreichend genügen kann und letztlich unbrauchbar wird. Die wesentlichen hydraulischen Gesichtspunkte für die Auswahl und die Auslegung von Meßstellen werden nachfolgend kurz umrissen.

2. WAHL DES STANDORTS

2.1 Flußlängsschnitt

Betrachtet man den Längsschnitt eines Flusses, dann können hier prinzipiell drei unterschiedliche Bereiche identifiziert werden (siehe Referat 1, "Grundbegriffe der Gerinnehydraulik", Bild 9).

- (L1) Meßstellen im freifließenden Gewässer, wobei im Anströmbereich, im Meßstellenbereich und über eine beträchtliche Strecke unterhalb der Anlage weder das Sohlengefälle noch die Rauheitsverhältnisse oder der Uferbewuchs nennenswerte Änderungen aufweisen, so daß im wesentlichen die Bedingungen für einen strömenden Normalabfluß vorliegen.
- (L2) Meßstellen im freifließenden Gewässer, in deren Bereich ein Gefälleknick, ein Wechsel der Sohlenrauheit oder des Uferbewuchses (bis zur HHQ-Linie) von Bedeutung für das Abflußgeschehen ist. In solchen Bereichen treten Aufstau- oder Absenkungseffekte und somit Abweichungen von den Normalabflußbedingungen auf.
- (L3) Meßstellen im gestauten Gewässer. Hier wird das Abflußgeschehen nicht nur von der Flußgeometrie und der Sohlenreibung geprägt, sondern auch noch vom Staubaubauwerk her beeinflusst. Bei weit stromauf gelegenen Meßstellen ergibt sich nur zeitweise ein Stauereffekt: Dort liegt bei kleinen Abflüssen die Stauwurzel unterstrom der Meßstelle, so daß diese sich im freifließen-

den Gewässerbereich befindet, während bei Hochwasserabflüssen der Staubereich die Meßstelle mit erfaßt und somit auch die Abflußkurve von den Bedingungen am Staubauwerk mit beeinflusst wird (zeitweise eingestauter Bereich).

Im ständig eingestauten Gewässerbereich dominiert der Einfluß der Stauanlage. Allerdings gewinnt mit zunehmendem Abstand vom Stauquerschnitt der Einfluß der Flußgeometrie und der Sohlenreibung an Bedeutung. Diese Einflußgrößen bestimmen dann zusätzlich zur Kontrollbedingung am Staubauwerk die örtliche Wasserstands-Abflußbeziehung.

Im Extremfall liegt die Meßstelle direkt oberstrom des Staubauwerks. In diesem Fall wird die Wasserstands-Abflußbeziehung bei allen Wasserführungen eindeutig von der Abflußkontrolle an der Stauanlage bestimmt.

Zur Wahl eines geeigneten Standorts entlang eines Flusses ergibt sich nach hydraulischen Gesichtspunkten eine klare Priorität:

- Am günstigsten sind Meßstellen an eindeutig definierten Kontrollbauwerken wie Stauanlagen, etc.
- Gewässerabschnitte mit einem natürlichen Absturz (natürliche Kontrolle) eignen sich ebenfalls besonders gut für die Anordnung von Meßstellen.
- Ebenfalls günstig sind Meßstellen in Abschnitten gemäß (L1), da hier neben der Kalibrierung durch Naturmessungen auch die hydraulischen Abflußbeziehungen für Normalabfluß zur Festlegung und Extrapolation der Abflußkurve mit herangezogen werden können.
- Ungünstiger sind Abschnitte gemäß (L2).
- Hydraulisch am schwierigsten sind Meßstellen im Staubereich gemäß (L3), insbesondere wenn die Stauanlage mit beweglichen Verschlüssen versehen ist und somit je nach Betriebsbedingungen die Wasserstands-Abflußbeziehung sich im gesamten Aufstaubereich ändert.

2.2 Flußquerschnitt

Maßgeblich für das hydraulische Verhalten der Meßstelle ist deren Lage und Anordnung im Fluß. Diese muß an den vorhandenen Flußquerschnitt im Meßstellenbereich angepaßt werden, wobei folgende Querschnittsformen unterschieden werden können (Bild 1):

- (A1) Der Flußquerschnitt weist eine regelmäßige Querschnittsform auf (Rechteck, Trapez), so daß die durchströmte Querschnittsfläche eine kontinuierliche Funktion der Wassertiefe bis zum Wasserstand bei HHQ ist. Im Anströmbereich, im Pegelbereich sowie über eine beträchtliche Strecke unterhalb der Meßstelle bleibt dieser Fließquerschnitt im wesentlichen konstant; es treten keine starken Krümmungen auf.
- (A2) Der Flußquerschnitt ist gegliedert, so daß die Beziehung Querschnittsfläche-Wassertiefe Knicke aufweist. Solche Knicke können von der Geometrie von Einbauten ebenso verursacht werden wie - besonders drastisch - durch Ausuferungen im Hochwasserfall über das Flußbett in seitliche Vorländer. Auch hier wird angenommen, daß der vorhandene Fließquerschnitt über eine größere Strecke von oberhalb der Meßstelle bis weit unterstrom im wesentlichen konstant bleibt und keine starken Krümmungen aufweist.
- (A3) Flußquerschnitte, die im Anströmbereich und/oder im Unterstrom der Meßstelle starke Querschnittsänderungen, Ablösezeiten oder starke Krümmungen aufweisen.

Für die Auswahl einer Abflußmeßstelle ergibt sich nach hydraulischen Gesichtspunkten eine klare Rangfolge in der Reihenfolge der Aufzählung (A1, A2, A3). Flußquerschnitte des Typs (A1) sind deshalb am besten geeignet, weil hier im gesamten Abflußbereich geometrisch eindeutige Verhältnisse vorliegen, wobei sich auch im Rauheitsverhalten keine drastischen Änderungen erwarten lassen. An solchen Meßstellen kann die aus Naturmessungen ermittelte Abflußbeziehung durch hydraulische Überlegungen abgesichert und auch eine plausible

Prognose für den Hochwasserbereich getroffen werden. Etwas schwieriger wird eine solche Prognose bei gegliederten Flußquerschnitten (A2), bei denen nicht nur die jeweiligen diskontinuierlichen Änderungen in der Beziehung zwischen Wassertiefe und Fließquerschnitt berücksichtigt werden müssen, sondern auch die oft drastischen Unterschiede im Rauheitsverhalten der einzelnen Abschnitte Berücksichtigung finden müssen. Darüber hinaus treten die Abflüsse im Flußschlauch und im wesentlich langsamer überströmten Vorland hydraulisch in Wechselwirkung, was die Abflußbeziehung wesentlich beeinflussen kann. Für gegliederte Querschnitte ist deshalb eine hydraulische Absicherung und Extrapolation der Abflußkurve wesentlich problematischer als im Fall (A1). Unregelmäßige Flußquerschnitte, wie sie in (A3) beschrieben sind, entziehen sich in der Regel einer hydraulischen Berechnung und sollten daher bei der Wahl von Abflußmeßstellen nach Möglichkeit gemieden werden.

3. GESTALTUNG DER MESSSTELLE

3.2 Elemente der Meßstelle

Die prinzipielle Anordnung einer Meßstelle in einem Fließgewässer ist in Bild 2 dargestellt. Man unterscheidet das OW-Gerinne, den Querschnitt, in dem die Wasserstandsmessung erfolgt, den Zuströmbereich zum Meßbauwerk mit deutlicher örtlicher Wasserspiegelabsenkung, das Bauwerk mit Kontrollquerschnitt, den UW-Übergangsbereich (gegebenenfalls mit Kolksicherung) und das UW-Gerinne. Außerdem ist ein Meßquerschnitt festzulegen, in dem die Flügelmessungen zur Bestimmung des Abflusses durchgeführt werden.

Die Elemente einer solchen Meßstelle müssen jeweils in Querschnitt und Höhenlage optimal aufeinander abgestimmt und den Verhältnissen angepaßt werden. Insbesondere ist durch die Gestaltung des OW-Gerinnes für eine ruhige, gleichmäßige Strömung im Pegelbereich Sorge zu tragen. Auch die Entfernung zwischen Bauwerk und Pegel ist so zu wählen, daß einerseits die Wasserstandsmessung möglichst nahe am Bauwerk erfolgt, um Störeinflüsse im Zwischenbereich auszuschal-

ten, andererseits der Abstand jedoch groß genug gehalten wird, so daß die Wasserstandsmessung außerhalb des örtlichen Absenkungsbereichs erfolgt. Die Lage des Meßquerschnitts für Flügelmessungen ist hingegen nicht zwangsläufig an das Abflußmeßbauwerk gebunden. Sie kann in vernünftigen Rahmen auch oberhalb oder unterhalb des Meßbauwerks angeordnet werden, wenn die örtlichen Gegebenheiten (zum Beispiel Brücken, Stege, etc.) dies erfordern.

3.2 Meßbereich und Bauwerkstyp

Wesentlich für die Auslegung einer Meßstelle ist die Festlegung des zu erfassenden Meßbereichs. Dieser ist nach unten durch den minimal zu erwartenden Abfluß festgelegt. Nach oben hin ist ein Bemessungsabfluß für das Bauwerk festzulegen, sowie ein noch höher liegender Abfluß, von dem ab der bauwerksbedingte Aufstau nach oberstrom vernachlässigbar klein werden soll. Es bietet sich an, als Bemessungsabfluß den Zentralabfluß (ZQ) zu wählen und die Grenze des spürbaren Aufstauereffekts im Bereich des Mittelwasserabflusses MQ anzusetzen. Hieraus ergibt sich der abzudeckende Meßbereich (NQ bis ZQ) und die maximal zulässige Bauwerkshöhe (Bedingungen bei MQ), welche maßgeblich für die Auswahl eines geeigneten Bauwerkstyps sind.

Aus Gründen der Meßgenauigkeit werden Abflußmeßbauwerke häufig in der Form gegliedert, daß Niedrigwasserabflüsse konzentriert in einem "Feinmeßbereich" erfaßt werden (zum Beispiel schmale Rinne mit scharfkantigem Meßwehr am Ende, Dreieckswehre) und mittlere Abflüsse durch die wesentlich größeren Hauptabmessungen des Bauwerks kontrolliert werden (Grobmeßbereich). Die Meßstelle ist nach Möglichkeit so zu dimensionieren, daß bei dem größten noch zuverlässig zu erfassenden Abfluß (Obergrenze des Meßbereichs) jeweils gerade die Rückstaugrenze erreicht wird. Bei Hochwasserabflüssen wird das Bauwerks dann unter zunehmenden Rückstau einfluß geraten.

Mit Hilfe von "Feinmeßbereichen" lassen sich auch oft die Bedingungen für eine Flügelmessung zur Kalibrierung besser definieren (konzentrierter Abfluß bei größeren Wassertiefen). Andererseits sind gerade Feinmeßbereiche von Natur aus stör anfällig gegen Ablagerungen von Feststoffen, etc.

Für einen bestimmten Bauwerkstyp erhält man aus der Forderung, daß die Rückstaugrenze beim Bemessungsabfluß (also zum Beispiel ZQ) erreicht werden soll, eine Festlegung der Höhenlage des Bauwerks im Gewässer. Dem gegenüber ist zu prüfen, ob bei Hochwasserabflüssen gewährleistet ist, daß der bauwerksbedingte Aufstau im Oberstrom sich in akzeptablen Grenzen hält. Da die Rückstaugrenze für verschiedene Bauwerkstypen beträchtliche Unterschiede aufweist, ist diese Betrachtung oft mit entscheidend für die Bauwerkswahl.

Darüber hinaus sind konstruktive Gesichtspunkte bei der Wahl des Bauwerkstyps mit zu berücksichtigen, sowie die Bandbreite des zu erfassenden Abflußmeßbereichs und die Absolutgröße der Anlage und der Abflüsse. Eine detaillierte Darstellung aller Überlegungen bei der Auswahl des geeigneten Bauwerkstyps ist in /1/ gegeben. Eine wesentliche Hilfestellung bietet eine vereinfachte Betrachtung der Größenordnungen von Abflüssen und Meßbereichen, in denen die einzelnen Bauwerkstypen zum Einsatz kommen. In Bild 3 sind diese Größenordnungen angegeben, wenn auch zwangsläufig mit einer gewissen "Unschärfe" aufgrund der Schematisierung. Man erkennt dennoch recht eindeutig, daß bei kleinen Abflüssen und großen zulässigen Aufstauhöhen scharfkantige Meßwehre am geeignetsten sind. Bei kleinen bis mittleren Abflüssen und kleinen zulässigen Aufstauhöhen bieten sich Meßgerinne an, während bei großen Abflüssen (und damit zwangsläufig großen Bauwerksabmessungen) breitkronige Wehre zum Einsatz kommen.

3.3 Gestaltung des Zulaufbereichs

Der Zulaufbereich zum Meßbauwerk ist so zu gestalten, daß eine möglichst ruhige, parallele oder kontinuierlich beschleunigende Anströmung des Bauwerks erreicht wird. Ablöse-

zonen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Dies macht je nach Gerinnequerschnitt oft den Einsatz von Flügelmauern oder strömungsführenden Wänden im Zulaufbereich erforderlich. Für die Anordnung und die notwendigen Abmessungen der Wände hat Ackers /2/ Angaben gemacht, die in Bild 4 zusammenfassend dargestellt sind. Bei Beachtung dieser Kriterien bleibt eine Beeinflussung der Abflußcharakteristik durch variierende Anströmbedingungen weitgehend ausgeschaltet und beschränkt sich auf eine Bandbreite von höchstens + 5% Variation.

Des weiteren ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit von Kontrollbauwerken, daß die Anströmung nicht als schießender Abfluß erfolgt, daß also die Froudezahl der Anströmung deutlich unter Eins liegt. Da bei Abflüssen in der Nähe des Grenzabflusses stehende Wellen auftreten können, die eine zuverlässige Wasserstandsmessung stark beeinträchtigen, wird empfohlen, die Geschwindigkeiten im Anström-bereich stets so klein zu halten, daß die Bedingung

$$Fr_o = \frac{v_o}{\sqrt{gy_o}} \leq 0,5 \quad (1)$$

eingehalten wird. Bei einer Froudezahl von 0,5 macht die Geschwindigkeitshöhe ($v_o^2/2g$) 12,5% der Wassertiefe y_o aus; bei kleineren Froudezahlen wird sie entsprechend noch kleiner.

3.4 Kolksicherung

Bei der konstruktiven Gestaltung eines Abflußmeßbauwerks muß auch die Frage der Standsicherheit gegen eine unterstrom-seitige Auskolkung und Erosion beachtet werden. Bei großen Wehranlagen bedeutet dies die Anordnung eines Tosbeckens unterhalb des Wehrs. Die Dimensionierung von Tosbecken ist eine klassische Aufgabe des Wasserbaus, auf die hier nicht eingegangen wird.

An kleinen Meßbauwerken, die bei Hochwasserabflüssen rückgestaut sind, ist gegebenenfalls eine Kolksicherungsstrecke unterhalb des Bauwerks vorzusehen. Hierfür wird vorgeschlagen /5/, die Ausbildung der Kolksicherungsstrecke im Unterwasser an der Form und den Abmessungen des natürlichen Kolk-

bildes zu orientieren. Der jeweilige Aufwand der Kolk-sicherung muß in einem angemessenen Verhältnis zum Gesamtbauwerk stehen.

4. STÖREINFLÜSSE

Bei der Auswahl einer Meßstelle sind außerdem folgende Gesichtspunkte mit zu beachten:

- In feststoffführenden Flüssen können Ablagerungen im Bauwerksbereich zu Veränderungen der Abflußkurve führen. Meßstellen sollten deshalb nach Möglichkeit in Gewässerabschnitte mit Erosionstendenz und nicht in solche mit Auflandungstendenz gelegt werden. Des weiteren muß dafür Sorge getragen werden, daß das antransportierte Feststoffmaterial - ob in Suspension oder als Geschiebe - nach Möglichkeit die Meßstelle passiert. Sofern örtlich begrenzte Ablagerungen unvermeidlich sind, ist zu prüfen, ob hierdurch die Abflußcharakteristik des Bauwerks nennenswert verändert wird.
- Verkräutungseffekte können das Abflußgeschehen saisonal stark beeinflussen. Bei der Wahl des Bauwerktyps und bei der Unterhaltung der Meßstelle ist darauf zu achten, daß diese Effekte die Abflußcharakteristik des Bauwerks nicht verändern.
- Uferbewuchs im Bauwerks- und Zuströmbereich kann die Abflußverhältnisse verändern. Solche Effekte sind bei der Gestaltung der Meßstelle nach Möglichkeit auszuschließen.
- Geschwemmsel kann sich an Bauwerken verfangen - insbesondere an scharfkantigen Konstruktionen - und durch Hängenbleiben im Bereich des Kontrollquerschnitts die Abflußcharakteristik stark verfälschen. Durch geeignete Maßnahmen ist dafür Sorge zu tragen, daß solche Störeinflüsse vermieden werden.

Dies sind nur die wichtigsten Aspekte, die bei Bau und Betrieb von Meßstellen berücksichtigt werden müssen. Selbstverständlich können die möglichen Störeinflüsse beim Entwurf zwar berücksichtigt, nicht aber verbindlich ausgeschaltet werden.

Meßstellen erfordern daher stets eine laufende sachkundige Überwachung und Unterhaltung.

5. KALIBRIERMÖGLICHKEITEN

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Auswahl einer Meßstelle ist die Frage der Kalibriermöglichkeit zur Ermittlung der Abflußbeziehung. In der überwiegenden Mehrzahl wird hierfür auf Flügelmessungen zurückgegriffen, die bei unterschiedlichen Abflüssen im Bereich der Meßstelle durchgeführt werden. Für die Qualität solcher Flügelmessungen und deren Integration zur Bestimmung des Durchflusses ist ein Bereich mit Parallelströmung Voraussetzung. Diese Voraussetzung ist in Flußabschnitten gemäß (L1, A1) am besten gegeben; die Abweichungen gemäß (L2) und (L3) führen zu keinen drastischen Fehlern in der Durchflußbestimmung, wohingegen gegliederte Querschnitte (A2) praktische Probleme bereiten und insbesondere unregelmäßige Flußquerschnitte gemäß (A3) zu erheblichen Fehlern führen können.

Andere Möglichkeiten der Kalibrierung einer Meßstelle in der Natur bieten die Ultraschallmessung und die Verdünnungsmethode.

Schließlich bietet jedes Kontrollbauwerk in einem Fließgewässer die Möglichkeit einer hydraulischen Kalibrierung. Das Abflußverhalten an Kontrollbauwerken läßt sich hinreichend genau angeben, wenn die Größe des jeweiligen Abflußbeiwerts bekannt ist. Dieser kann je nach Bauwerksart

- aus Literaturangaben gewonnen werden;
- durch wenige, gezielte Naturmessungen vor Ort bestimmt werden;
- über eine Einzeileichung im Labor im Maßstab 1 : 1 bestimmt werden;
- aus einer Typeneichung im Labor im Maßstab 1 : 1 bestimmt werden;
- aus einem kleinmaßstäblichen Modellversuch im Labor ermittelt werden.

Alle genannten Möglichkeiten der Kalibrierung haben ihre Vorzüge und ihre Schwächen, über die im weiteren Verlauf des Lehrgangs im einzelnen berichtet wird. Die Auswahl der geeigneten Methode muß abhängig von den jeweiligen Gegebenheiten von Fall zu Fall entschieden werden. Wesentlich erscheint jedoch, alle Möglichkeiten in Erwägung zu ziehen und sich nicht einseitig und ausschließlich auf ein Verfahren zu beschränken. Insbesondere erscheinen die hydraulischen Verfahren in der Praxis derzeit noch nicht voll ausgeschöpft zu werden.

LITERATURHINWEISE

- /1/ Bos, M.G., Editor: "Discharge Measurement Structures", Delft Hydraulics Laboratory publication nr. 161, 1976
- /2/ Ackers, P. et al.: "Weirs and Flumes for Flow Measurement", John Wiley and Sons, New York, 1978
- /3/ Rother, K.H.: "Probleme bei Unterhaltung und Ausbau von Meßnetzen", 14. Fortbildungslehrgang Hydrologie, DVWK, 1982
- /4/ Daucher, H.: "Die Wasserstands-Abfluß-Beziehung", 14. Fortbildungslehrgang Hydrologie, DVWK, 1982
- /5/ Müller, P., und Kobus, H.: "Hydraulische Entwurfs- und Bemessungskriterien für Sohlschwellen", Wasserwirtschaft, 71. Jg., Heft 10, Oktober 1981

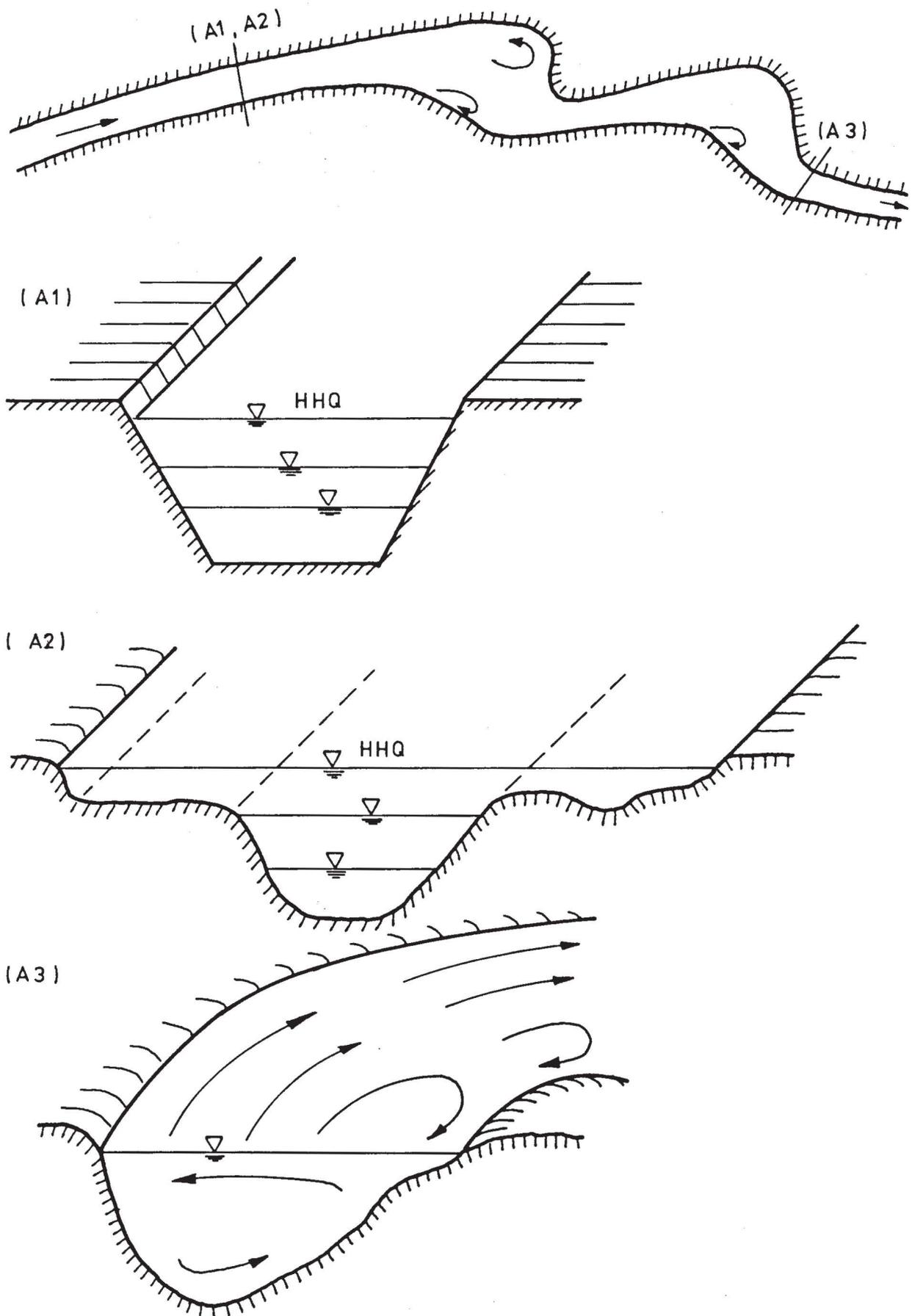


Bild 1 : Zur Charakterisierung der Flußgeometrie

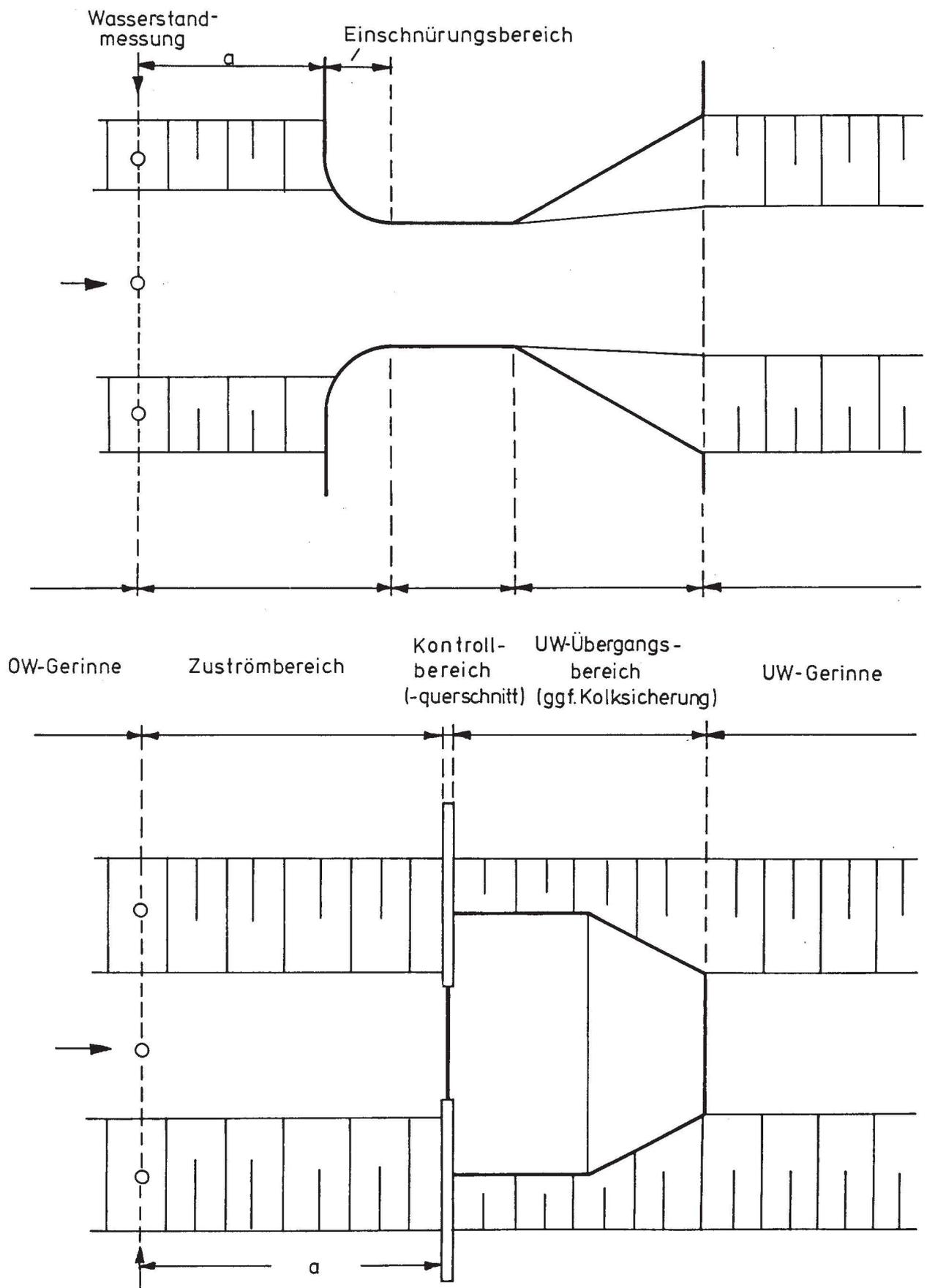


Bild 2: Anordnung einer Meßstelle

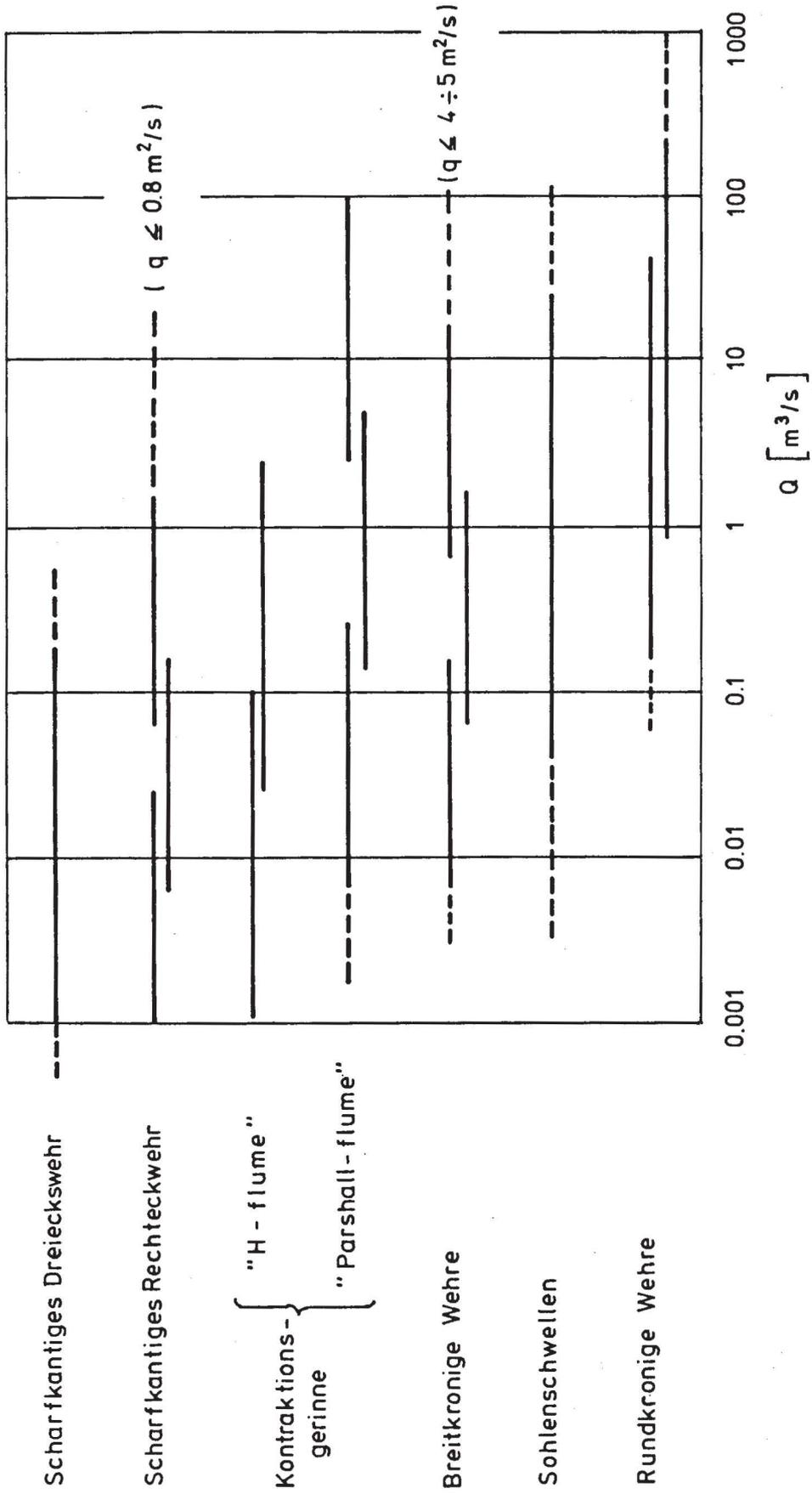
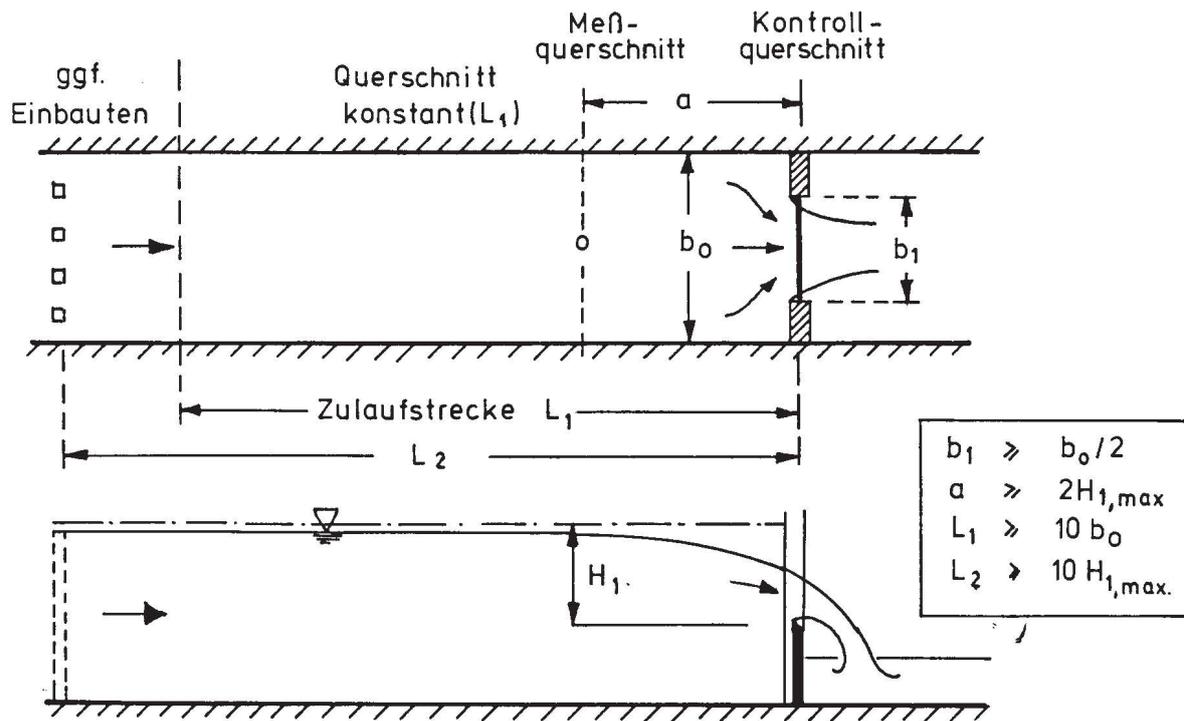


Bild 3 : Einsatzbereiche verschiedener Meßbauwerke

Meßbauwerke mit Seitenkontraktion:



Meßbauwerke mit Leitwänden:

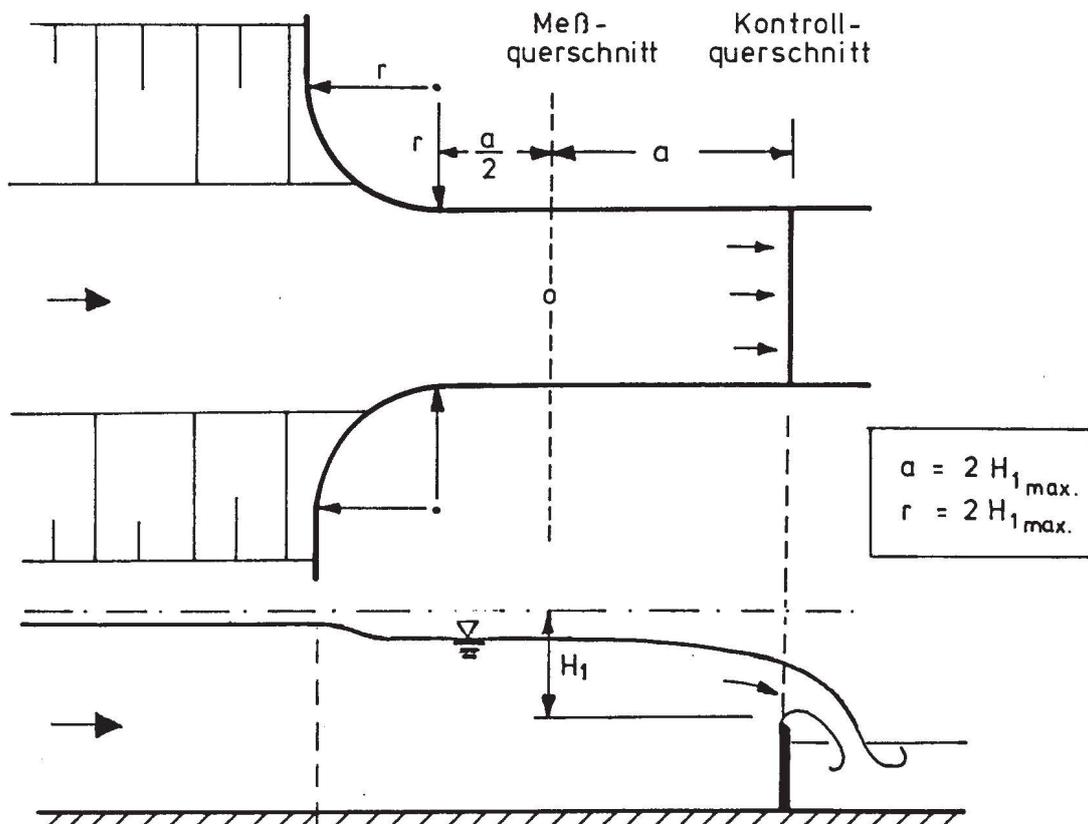


Bild 4 : Gestaltung des Zuströmbereichs