

# Bauwerkshydraulik und Standortoptimierung für Kleinwasserkraftwerke in China

Die Optimierung von Kleinwasserkraftstandorten bildet eine herausfordernde Aufgabe. Moderne Methoden, wie numerische Modellierungen zur Strömungsanalyse und weitergehende Werkzeuge zur Standortanalyse und -optimierung, werden genutzt, um ausgewählte energetische, gewässerökologische und wirtschaftliche Aspekte zu verbessern. Am Beispiel von Anlagen aus China werden Einsatzmöglichkeiten dieser Methoden hinsichtlich der örtlichen Verhältnisse gezeigt. Die verwendeten Verfahren sind in praxisorientierten Leitfäden ausführlich beschrieben.

Klaus Träbing, Sarah Dickel und Stephan Theobald

## 1 Ausgangslage und Ziele

Wasserkraftnutzung ist eine regenerative, nur mit geringen Emissionen verbundene Form der Stromerzeugung. Als sehr robust mit einer stabilen Wirkleistung gelten die dem Grundlastbereich zuzuordnenden Laufwasserkraftanlagen, die aber auch das aquatische Ökosystem beeinträchtigen können [2]. Diesbezüglich gab es in den letzten Jahren intensive Anstrengungen zur hydraulischen, technischen, gewässerökologischen und energetischen Verbesserung. Beispielsweise wird die Herstellung von anlagenbedingt unterbrochener Durchwanderbarkeit für aquatische Organismen in Mitteleuropa als wesentliches Ziel der Gewässerbewirtschaftung angesehen und nachträglich auch an bestehenden Stauanlagen umgesetzt.

Eine Übertragung deutscher beziehungsweise europäischer Ansätze auf China ist nur eingeschränkt möglich. Das hier berichtete HAPPI-Teilprojekt [8] zielte für Kleinwasserkraftanlagen auf die Verbesserung der Planungsergebnisse durch Verwendung von modernen Methoden der hydraulischen Analyse und der Standortoptimierung für deren exemplarische Anwendung auf chinesische Verhältnisse. Ein Schwerpunkt waren Optimierungsdefizite in der baulichen Gestaltung von Wasserbauwerken hinsichtlich Nachhaltigkeitsaspekten, wie Stromerzeugung, gewässerökologischer Anpassung und ökonomischer Effizienz [10]. Auch bei der mitteleuropäischen Kleinwasserkraftnutzung besteht bei Einsatz der entsprechenden Ver-

fahren noch teilweise erhebliches Verbesserungspotenzial. Beispiele zeigen, dass hydraulisch ungünstig entworfene Bauformen durch aktuelle Analysemethoden identifiziert und vermieden werden können [12].

Für die Bestimmung der Stromerzeugung und wesentlicher wirtschaftlicher Parameter wurde ein Programmpaket weiterentwickelt, das neben anlagenspezifischen Parametern wie Maschinenausstattung auch die örtlichen hydrologischen und hydraulischen Bedingungen von Abfluss und Fallhöhe sowie gewässerökologische Maßnahmen berücksichtigt (s. Abschnitt 3.1).

Ein weiteres wichtiges Vorhabensziel war die Vermittlung der Forschungsergebnisse in Forschung und Praxis. Hierzu wurde ein Beitrag für ein das Gesamtvorhaben umfassendes Planungswerkzeug [8] erarbeitet. Dabei wurden von Machbarkeitsbetrachtungen bis hin zu Ausführungsoptimierungen planungstiefenabhängig die Bearbeitungsverfahren zusammengestellt und erläutert. Die Ergebnisse flossen außerdem in die Ableitung von einzelnen thematischen Leitfäden ein. Für die Kleinwasserkraftnutzung in China wurde damit ein internationales Beispiel für die Übertragbarkeit der genannten Methoden auf Grundlage bestehender und weiterentwickelter Verfahren sowie auch der angepassten Übernahme von Best-Practice-Erfahrungen aus Mitteleuropa erstellt.

## 2 Auswahl der exemplarischen Anlagen

Im Laufe der Vorhabenbearbeitung wurden verschiedene exemplarische Wasserkraftanlagen für verschiedene Stadien aus Bestand und Planung eines Standortes betrachtet [8]. Dabei wurden die zu betrachtenden Standorte einvernehmlich von den chinesischen und den deutschen Projektpartnern gemeinsam ausgewählt. Zur Bewertung der chinesischen Kleinwasserkraftanlagen der untersuchten Anlagenkategorien wurden die aus China regional verfügbaren Daten übernommen.

Die betrachteten Bearbeitungsinhalte waren den in Deutschland typischen Planungsschritten von der Grundlagenermittlung bis zur optimierten Ausführungsgestaltung zugeordnet.

### Kompakt

- Moderne Methoden zeigen bauwerkshydraulische Optimierungen für Kleinwasserkraftanlagen in China auf.
- Standortbezogen zu berücksichtigen sind auch energetische, gewässerökologische und ökonomische Aspekte.
- Vorgehensweise und ausgewählte Ergebnisse sind in Leitfäden dargestellt.

### 3 Analysesoftware SHSF-Engineering

#### 3.1 Grundzüge zu SHSF-Engineering

Die Analysesoftware SHSF-Engineering wurde aus einem Vorläuferwerkzeug [9] für die spezifischen chinesischen Verhältnisse weiterentwickelt. Die Bezeichnung SHSF bezieht sich auf das chinesische Förderprogramm treibstoffsubstituierender Kleinwasserkraftwerke (Small Hydropower Substituting Fuel, SHSF) [8]. Die Analysesoftware SHSF-Engineering betrachtet für Wasserkraftanlagen die örtlichen technischen, energetischen, gewässerökologischen sowie ökonomischen Gesichtspunkte und dient auch der Abschätzung zu erwartender Investitionen und Betriebskosten.

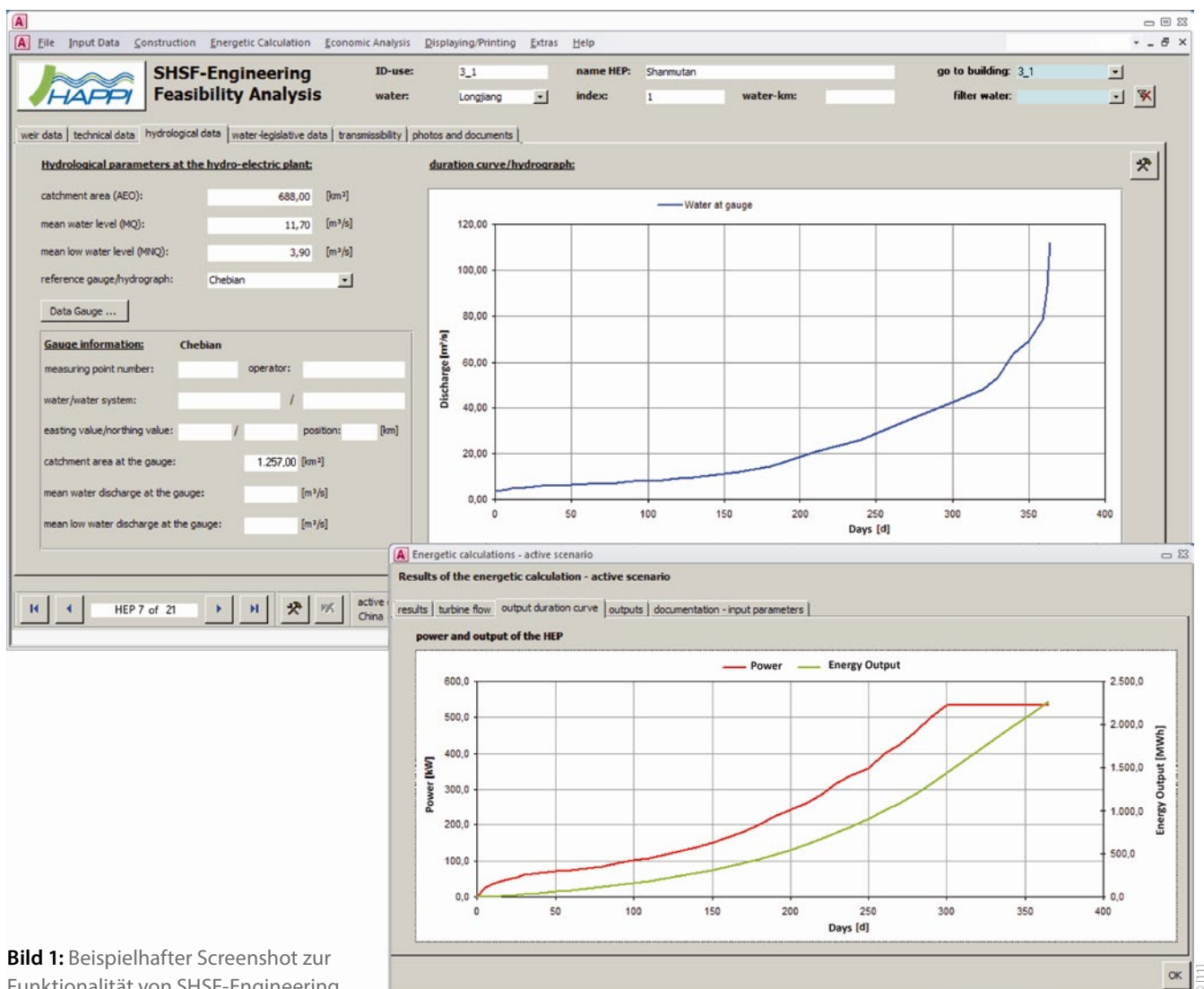
In SHSF-Engineering sind Erfassungs-, Berechnungs-, Ausgabe- und Dokumentationsfunktionalitäten sowohl für einzelne Wasserkraftanlagen als auch für Gruppen von Anlagen unter einer gemeinsamen Datenverwaltung mit einheitlicher Benutzeroberfläche enthalten (**Bild 1**). Dies umfasst Daten, wie z. B. das Wasserdargebot (s. a. [6]) und dessen statistische Beschreibung, Schlüsselkurven, Angaben zur maschinellen Ausstattung, gewässerökologisch begründete Durchflüsse, Leistungs-

pläne und Jahresarbeitsvermögen. Für wirtschaftliche Untersuchungen sind Vergütungs- und Kostenanalysen oder auch Kapitalwert und Annuitätenvergleich implementiert. Außerdem wurden die Investitionen der baulichen Anlagen als Komponenten verschiedener Bauwerksteile bzw. Kostengruppen eingeführt.

Ausgewertet wurden beispielsweise die Daten der bekannten Wasserkraftanlagen aus Wasserkraftkatastern (Provinz Guizhou), zu Wasserkraftplanungen am Chong'an-Fluss (ebenfalls Provinz Guizhou) und vertiefende Daten der chinesischen Projektpartner aus der Provinz Yunnan [8]. Dabei wurden auch regional dokumentierte Ausbauparameter und Kosten ermittelt, die sich auf die installierte Leistung, ausgewählte Bauwerks-elemente oder Baustoffe sowie Ausbauparameter, wie Fallhöhe und Ausbaudurchfluss, beziehen. Durch die regionalen Daten konnten neben Nieder- und Mitteldruckanlagen auch Hochdruckanlagen in den Untersuchungen berücksichtigt werden.

SHSF-Engineering wurde insbesondere verwendet, um

- plausibilisierende Überprüfungen der bekannten Kleinwasserkraftanlagen aus den Provinzen Guizhou und Yunnan durchzuführen, z. B. zum Zusammenhang zwischen Gesamtkosten und installierter Leistung (**Bild 2**);



**Bild 1:** Beispielhafter Screenshot zur Funktionalität von SHSF-Engineering

- die Stromerzeugung für Gestaltungsvarianten der hydraulischen Optimierung und gewässerökologischen Verbesserungsansätze zu berechnen (s. Abschnitt 4.2);
- Eingangswerte zur überschlüssigen Betrachtung von Anlagenstandorten hinsichtlich Energie, Ökologie, Ausbaugrad usw. einzugrenzen und auf dieser Grundlage planungstiefenabhängig robuste Ansätze in der Anwendung der Planungsleitfäden bieten zu können.

### 3.2 Ökonomische Voranalyse des beplanten Standortes YinDiBa

Der beispielhaft gewählte Standort YinDiBa am Wuyang-Fluss liegt an einem frei fließenden Abschnitt innerhalb einer bestehenden Staukette (s. a. Bild 1 in [6]). An dem vorgesehenen Standort besteht noch kein Wasserkraftwerk (**Bild 3 oben**), so dass die Freilanduntersuchungen vor allem als Vor-Ort-Begehung und die Bewertung der Planung anhand von verfügbaren Unterlagen durchgeführt wurden. Die seitens der chinesischen Projektpartner zur Verfügung gestellten Eingangsdaten umfassen im Wesentlichen bauwerkspezifische Darstellungen der geplanten Wasserkraftanlage YinDiBa. Die Daten wurden anhand einer Ortsbegehung abgeglichen und für die weitere exemplarische Bearbeitung übernommen. Nach Angabe der chinesischen Projektpartner waren die Planungen im Wesentlichen abgeschlossen.

Der Wasserkraftstandort YinDiBa wurde laut chinesischen Angaben für eine Ausbauleistung von  $P_A = 6 \text{ MW}$  bei einem Ausbaudurchfluss  $Q_A = 17 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Gesamtfallhöhe von  $h_f = 39 \text{ m}$  beplant. Gewässerökologisch begründete Maßnahmen, wie beispielsweise Fischschutz, -aufstieg oder -abstieg, waren nicht vorgesehen.

Der geplante hohe bauliche Aufwand und die daraus resultierenden Kosten zum Bau der Wasserkraftanlage YinDiBa erschienen relativ groß. Dies warf unmittelbar die Frage auf, ob dieser Planungsvorschlag wirtschaftlich nachhaltig ist. Für regionale Projekte vergleichbarer Leistung von 6 MW ergab die Untersuchung mit der SHSF-Engineering-Methode, dass leistungsspezifische Kosten von typischerweise 15 000 RMB/kWh bei einer Spannweite von ca. 10 000 RMB/kWh bis 20 000 RMB/kWh

zu erwarten wären. Die konkret vorliegende Planung des Standortes YinDiBa ergab leistungsspezifische Investitionen von rund 30 000 RMB/kWh. Auch der Quotient aus Investitionen zu Jahresarbeit ergibt mit rund 6 RMB/kWh einen deutlich überdurchschnittlichen Wert (**Bild 4**). Die überdurchschnittlich hohen Kosten waren ein klarer Hinweis auf eine relativ geringe ökonomische Nachhaltigkeit des Vorhabens im Vergleich zu anderen Wasserkraftstandorten.

Zur Verbesserung dieser Situation wurde mit SHSF-Engineering in einer Leistungsplanberechnung untersucht, ob eine Variation der Auslegungsparameter, wie Ausbaudurchflüsse oder Turbinenanzahl, die Stromerzeugung erhöht oder die spezifischen Kosten reduziert. Diese Optimierungsbetrachtungen zeigten, dass keine erhebliche Kostensenkung oder Nutzenmehrung erreichbar und daher die ungünstige Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht wesentlich besserbar war. Später wurde von chinesischer Seite mitgeteilt, dass die Umsetzung an diesem Standort vorläufig nicht weiter verfolgt wird.

## 4 Hydraulische Optimierungen

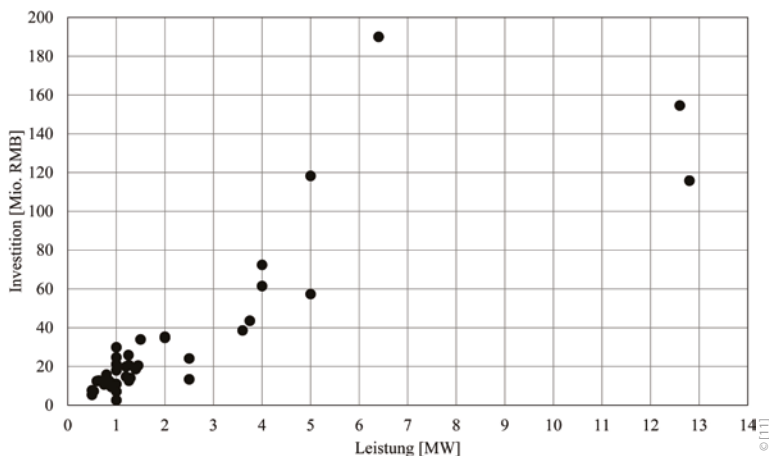
### 4.1 Grundzüge

Ein wesentlicher Inhalt des hier berichteten Vorhabens war die Methodenentwicklung und -anwendung zur hydraulischen Analyse und darauf folgender Optimierung von Einzelstandorten. Die Ergebnisse flossen unmittelbar in die Leitfäden ein. Dabei wurde planungstiefenabhängig unterschieden zwischen robusten Ansätzen von vorplanerischen Analysen und detaillierten Untersuchungen anschließender Planungsschritte wie beispielsweise der gestaltoptimierenden Entwurfsplanung.

Die verwendeten Eingangsdaten wurden von den chinesischen und deutschen Forschungs- und Praxispartnern zur Verfügung gestellt oder bei eigenen Vor-Ort-Untersuchungen erhoben. Die Analyse der Strömungsverhältnisse diente vor allem der Optimierung der Stromproduktion und der Berücksichtigung gewässerökologischer Belange. Zu untersuchen war, inwieweit dieses Vorgehen unter chinesischen Bedingungen anwendbar ist.

Für die Betrachtung der gewässerökologischen Aspekte wurde die Datengrundlage der örtlichen chinesischen Planungen und Genehmigungen herangezogen. Bei der Ableitung möglicher Verbesserungsvorschläge wurden diese auf den internationalen Stand des Wissens beziehungsweise Stand der Technik ausgerichtet.

Zu Beginn der Strömungsanalyse sowohl bei bestehenden Anlagen als auch bei geplanten Anlagen und neuen Standorten standen zunächst Ortsbegehungen mit Vor-Ort-Analysen. Diese dienten der Klärung der Aufgabenstellung, der örtlichen Randbedingungen, der Stimmigkeit der Unterlagen und der verwendbaren Methoden. Sie beruhten auf örtlicher Anwendung von Expertenwissen und waren nicht durch andere Herangehensweisen ersetzbar. Hierbei ließen sich oft bereits erste Hinweise auf mögliche Verbesserungen erkennen. Der Vergleich von gestalterischen Varianten oder Alternativen beruhte dann vor allem



**Bild 2:** Zusammenhang zwischen installierter Leistung und Investition der mit SHSF-Engineering untersuchten Kleinwasserkraftanlagen



**Bild 3:** Sperrenstandorte von beispielhaft bearbeiteten Wasserkraftstandorten: oben: geplanter Standort YinDiBa (Blick stromab); unten: Bestandskraftwerk Fujjiang (Blick stromauf)

auf dreidimensional hydrodynamisch-numerischen (3-D-HN) Modellierungen mit der Software Flow3D und den daraus folgenden energetischen, ökonomischen und gewässerökologischen Bewertungen. Das neben der Vor-Ort-Analyse und der HN-Modellierung ebenfalls übliche und gut erprobte Verfahren der physikalischen Strömungsmodelle wurde in diesem Vorhaben wegen des wesentlich höheren Aufwandes nicht eingesetzt.

Anpassungsvorschläge erfassten auch Planungsziele, die sich insbesondere bei Berücksichtigung gewässerökologischer Gesichtspunkte ergaben. Hierzu unterscheidet sich die Verfügbarkeit von Lösungen sehr stark. Während zur Aufwärtsdurchwanderbarkeit umfangreiche Erfahrungen mit einer Vielzahl von allgemein anerkannten technischen Lösungen bestehen und solche auch exemplarisch anwendbar waren, ist die Abwärtsdurchwanderbarkeit derzeit noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Dementsprechend bestehen für die Abwärtspassierbarkeit noch keine allgemein anerkannten Lösungen, sondern es werden im Rahmen von Forschungsvorhaben und an Pilotanlagen praktische Erfahrungen gesammelt. Übertragen auf die örtlichen Verhältnisse in China bedeutete dies, dass für die Aufwärtspassierbarkeit technische Lösungsansätze auch zur nachträglichen Herstellung der Durchwanderbarkeit vorgeschlagen wurden, während für die Abwärtspassierbarkeit im Wesentlichen der individuelle Forschungsbedarf aufgezeigt wurde.

#### 4.2 Exemplarische Anwendung hydraulischer Optimierungen

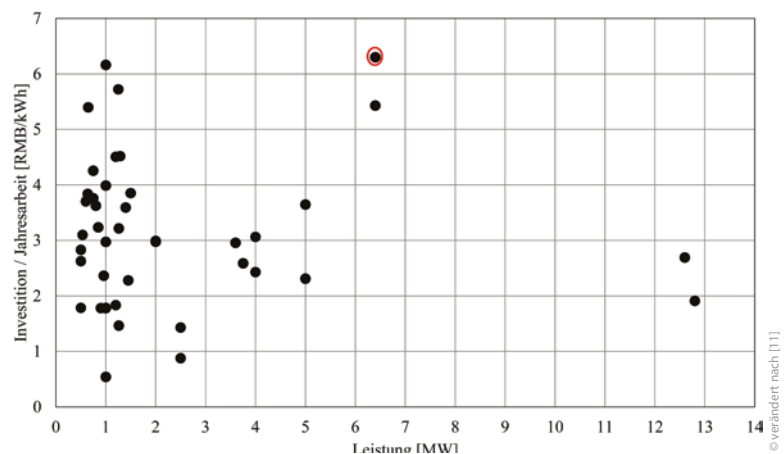
##### Bestehende Kleinwasserkraftanlage Fujjiang

Der bestehende Wasserkraftstandort Fujjiang liegt am Quingshui-Fluss, Maijiang-County, Provinz Guizhou, VR China. Die von den chinesischen Projektpartnern zur Verfügung gestellten Daten umfassen vor allem

bauwerkspezifische Grundlagen, wie Grundrisse, Längs- und Querschnitte sowie Bemessungsangaben. Die Daten wurden auszugsweise mit eigenen Messungen verglichen.

Die Wasserkraftanlage Fujjiang besitzt gemäß den zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen eine Ausbauleistung von  $P_A = 1,9 \text{ MW}$  bei einem Ausbaudurchfluss von  $Q_A = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Gesamtfallhöhe von  $h_f = 6,7 \text{ m}$ .

Bei dem Wasserkraftwerk Fujjiang handelt es sich um ein Flusskraftwerk. Der Standort verfügt über ein Stauwehr mit massivem Grundkörper und aufgesetztem Schlauchwehr (**Bild 3 unten**). Das Krafthaus befindet sich auf der linken Außenseite einer Rechtskrümmung und ist durch eine bogenförmige Rechenanlage direkt am Wehr mit mehreren laufstegüberspannten Rechenfeldern in einer Bucht angelegt (**Bild 5**). Die Rechen werden manuell gereinigt. Das Krafthaus weist drei Turbinen und ein rechtsseitiges Spülschütz auf. Eine Fischaufstiegsanlage besteht nicht.



**Bild 4:** Verhältnis von Investition zu Jahresarbeit der geplanten Wasserkraftanlage YinDiBa (rote Markierung) im regionalen Vergleich





**Bild 5:** Zulaufbereich der bestehenden Wasserkraftanlage Fujiang (vom linken Ufer aus gesehen)

Als ein Schwerpunkt der hydraulischen Optimierung zeigte sich bereits während der Ortsbegehungen im Rahmen der Vor-Ort-Analyse die ungünstige Strömung innerhalb des Zulaufbereichs zwischen Rechenfeldern und Turbineneinlauf. Dort gab es eine ausgeprägte Rücklaufströmung, die abfluss- und wasserstandunabhängig durch die abgelöste Strömung hinter der linksseitigen Uferwand verursacht wurde. Merkliche Mengen an grobem Schwimmgut auf der Wasseroberfläche zwischen Rechenanlage und Turbineneinlauf waren zudem ein eindeutiger Hinweis auf zumindest gelegentliches Überspülen der Rechenanlage. Bei den Freilandarbeiten wurde die zugängliche Rechengeometrie erhoben.

Für den Zulaufbereich wurden die Strömungsverhältnisse unterstützend zu den Freilanduntersuchungen mit einem 3-D-HN-Modell mit einer räumlich verdichteten Auflösung im Bereich des Rechenfeldes umfangreich analysiert. Dabei stimmten die örtlichen Beobachtungen der Strömungsverhältnisse unabhängig vom gewählten Turbulenzmodell gut mit den Simulationsergebnissen überein. Sensitivitätsanalysen zeigten weiterhin eine geringe Abhängigkeit der prinzipiellen Strömungsverhältnisse von der Betriebsweise der Turbinen (**Bild 6**). Auf Grundlage der örtlichen Beobachtungen und der 3-D-HN-Modellierungen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Für den Zulaufbereich wurden unterschiedliche Geometrien der Zulaufsohle, der Rechenfelder, der Uferanbindung und des Turbinenbetriebs variiert und miteinander verglichen. Als deutlich wichtigstes Gestaltungs- und Betriebskriterium erwies sich der Anschluss der Rechenanlage an das linke Ufer. Die unerwünschten Rücklaufzonen und Querströmungen vor den Turbineneinläufen würden in der Vorzugsvariante durch die Umgestaltung der linken Uferanschlusswand zu einem weiteren Rechenfeld hydraulisch wirksam deutlich vermindert (**Bild 7**). Die daraus resultierende mögliche Fallhöhenvergrößerung mindert die Höhenverluste im Zulaufbereich um rund 12 cm, entsprechend rund 2,1 % von 6,7 m Fallhöhe, ab.
- Die 3-D-HN-Modellierung des Absperrschalles eines Turbinenschnellschlusses lässt im Oberwasser Anstiege von

einigen Dezimetern erwarten. Dadurch kann Personal direkt durch die Strömungskräfte beziehungsweise auch indirekt durch Anprall von über das Rechenfeld gehobenem grobem Schwimmgut gefährdet werden. Hier bildet die nachträgliche beidseitige Ergänzung des Rechensteiges um ein sehr stabiles Gelände eine Absturzsicherung für das Personal (s. a. [3]) und einen verbesserten Rückhalt für grobes Schwimmgut.

### Neustandort Shichang

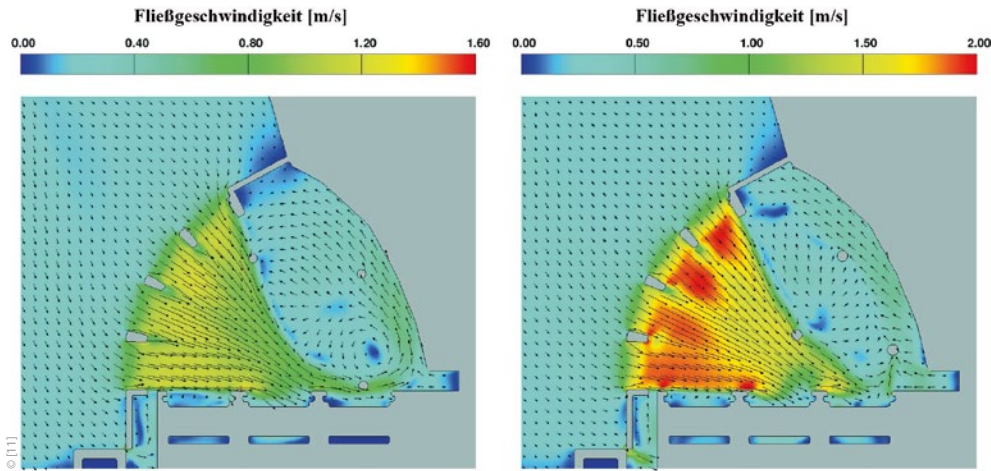
Der Standort Shichang (s. a. Bild 3a in [3]) bildet die oberste Staustufe einer geplanten Staustufenkette von drei neuen Wasserkraftstandorten am Chong'an-Fluss. Diese Standorte fügen sich zwischen zwei bestehenden Anlagen kleinerer Fallhöhe ein.

Mit den von den chinesischen Partnern in großem Umfang übergebenen Eingangsdaten war es möglich, konkrete Ansätze für Verbesserungsvorschläge für die Wasserkraftnutzung an bisher nicht genutzten Gewässerabschnitten beispielhaft zu formulieren (s. a. [5]).

Der Neustandort Shichang weist laut Planungsunterlage eine Ausbauleistung von  $P_A = 14$  MW bei einem Ausbaudurchfluss von  $Q_A = 86$  m<sup>3</sup>/s und einer Gesamtfallhöhe von  $h_f = 21$  m auf. Die Wasserentnahme befindet sich auf der rechten Gewässerseite und führt durch einen Druckstollen zum Krafthaus mit drei Turbinen. Die Planung des Neustandortes weist keine Einrichtungen für den Fischauftstieg, den Fischschutz oder den Fischabstieg auf.

Zur Verminderung des Rechengutanfalls wurde vor dem Entnahmebauwerk eine schwimmende Tauchwand, die Schwimmgut zum rechten Wehrfeld führen kann, untersucht. Die tauchwandverursachte Änderung der Strömungsverhältnisse wurde in einem 3-D-HN-Modell intensiv untersucht (**Bild 8**) und als vernachlässigbar bewertet. Die resultierende Schwimmgutbewegung wurde mit einer strömungsgekoppelten Bewegtkörpersimulation analysiert und weist die Weiterleitung von Schwimmgut bei Hochwasser nach.

Hinsichtlich der Fischfauna wurde die Herstellung der Aufwärtspassierbarkeit betrachtet. Bei Annahme einer Fischauftstiegsanlage als konventionelles Freiwasserspiegelgerinne würden die Baukosten aufgrund der Schluchtlage des Neustandorts erheblich gesteigert. Zusätzlich ergab die Analyse mit SHSF-Engineering mittels Leistungsplan sehr wesentliche Stromerzeugungsverluste durch die reduzierten Turbinendurchflüsse. Eine Variation der Auslegungsparameter hinsichtlich Auslegungsdurchflüssen, Turbinenanzahl oder Krafthausausrichtung zeigte keine Verbesserung dieser Situation. Deshalb bestünde die vorläufige Vorzugsvariante bei diesem Neustandort in einer Fischschleuse mit Sammelgalerie und Lockstropmpumpe [4]. Letztere müsste mit rund 0,2 % des Ausbaudurchflusses beschickt werden und verstärkt dann die Leitströmung zur Sammelgalerie auf vorläufig angenommen rund 2 % des Ausbaudurchflusses. In einer umfangreichen 3-D-HN-Modellierung (**Bild 8**) wurde die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten im Unterwasser des Krafthauses ermittelt und analysiert. Ausgehend von vorläufig übertragenen ethohydraulischen Befunden [1] besteht für aufwanderungsorientierte Fische ein günstiger Weg bis unmittelbar zur über den Turbinenauslässen angeordneten Sammelgalerie.



**Bild 6:** Ergebnisse zur Strömungsanalyse des bestehenden Zulaufbereichs in Fujiang: links: Zwei-Turbinen-Betrieb (in Fließrichtung rechte Turbine geschlossen), rechts: Drei-Turbinen-Betrieb

Die Lockstrompumpe wurde mit SHSF-Engineering auf deren energetische Wirkung in Sensitivitätsanalysen untersucht. Dabei zeigte sich eine praktisch vernachlässigbare Reduktion der Jahresarbeit um rund 0,4 %. Die alternative Anordnung einer Lockstromturbine anstelle der Lockstrompumpe erscheint demgegenüber wegen des zusätzlichen baulichen und betrieblichen Aufwandes für die örtliche Situation unwirtschaftlich.

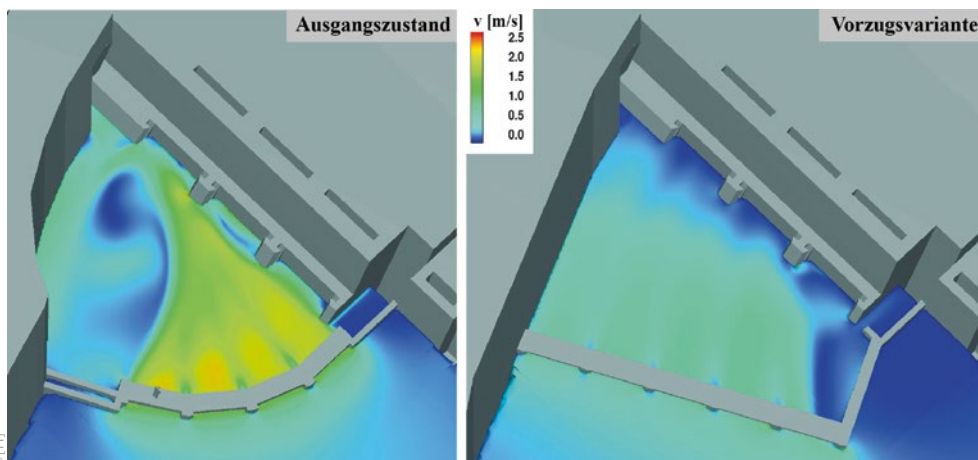
Zur Sicherung des Fischabstiegs bedarf es nach gegenwärtigen Vorstellungen einer geeigneten Bypasslösung (s. z. B. [1]) deren zuverlässige Konzeption aber ohne wesentlich tiefergehende örtliche Untersuchungen nicht möglich war.

### 5 Schlussfolgerungen für die Transformation in die Praxis

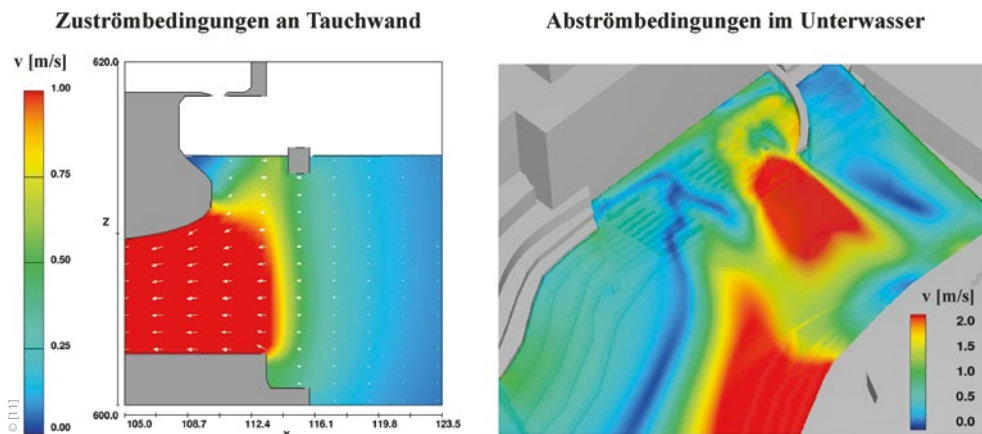
Die beispielhaft betrachteten Fälle zeigen die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der modernen Methoden zur Analyse der Bauwerkshydraulik und Standortoptimierung von Kleinwasserkraftnutzung in China. Sowohl für die bestehende Anlage Fujiang als auch die geplante Anlage YinDiBa und den Neustandort Shichang konnten wertvolle exemplarische Hinweise für die entsprechende Bearbeitung abgeleitet werden.

Konkrete Planungsprozesse an Kleinwasserkraftanlagen variieren in Abhängigkeit der regionalen Bedingungen. Für verschiedene Regionen und Planungsaufgaben sind Anleitungen oder Planungshilfen bereits verfügbar, beispielsweise für den Einzelstandortentwurf in Europa das umfangreiche und gut geeignete Planungshandbuch der ESHA [7]. Für die Transformation der hier vorgestellten Ergebnisse in die Praxis wurden einzelne thematisch gegliederte Leitfäden auch im Hinblick auf deren Anwendbarkeit in China erarbeitet.

Ein wesentliches Hauptergebnis der in diesem Vorhaben an verschiedenen chinesischen Einzelfällen abgeleiteten und illustrierten Vorgehensweise zur hydraulischen, gewässerökologischen, energetischen und ökonomischen Optimierung von Kleinwasserkraftanlagen war ein Beitrag zum integrierten Planungswerkzeug [8]. Dieses besteht aus thematisch abgegrenzten Leitfäden und übergreifenden Erläuterungen, die sich auf die chinesischen Bedingungen anwenden lassen. Insbesondere für die hier berichteten Ergebnisse mit zwei zugehörigen Leitfäden („Determination of hydropower energy production and economical aspects“, „Methods for hydraulic analysis and optimization“) bildet das integrierte Planungswerkzeug eine gute Grundlage für die weitere Transformation in die Praxis. Hierdurch konnte auch die Zielstellung des Capacity-Building erreicht



**Bild 7:** Bestandsanlage Fujiang, Variantenvergleich der Geschwindigkeitsverteilungen bei Ausbaudurchfluss



**Bild 8:** Numerische Strömungsanalyse zum Neustandort der Wasserkraftanlage Shichang

werden. Diesem wurde unmittelbar durch Fortbildungsveranstaltungen mit Teilnehmern aus Wissenschaft, Verwaltung, Planern und Betreibern in China entsprochen.

Die Internet-Präsenz auf [www.happishp.com](http://www.happishp.com) bietet langfristigen Zugriff auf die im Projekt erarbeiteten Leitlinien.

### Dank

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WCL1307E gefördert, wofür an dieser Stelle ausdrücklich gedankt sei. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der erfolgreiche Abschluss des Vorhabens ist insbesondere auch dem chinesischen und deutschen Projektteam und der Projektleitung zu verdanken.

### Autoren

**Dr.-Ing. Klaus Träbing**

**Sarah Dickel, M. Sc.**

**Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald**

Universität Kassel

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel

[k.traebing@uni-kassel.de](mailto:k.traebing@uni-kassel.de)

[s.dickel@uni-kassel.de](mailto:s.dickel@uni-kassel.de)

[s.theobald@uni-kassel.de](mailto:s.theobald@uni-kassel.de)

### Literatur

- [1] Adam, B.; Lehmann, B.: Ethohydraulik. Berlin: Springer Verlag, 2011.
- [2] Giesecke, J.; Heimerl, S.; Mosonyi E.: Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb. Berlin: Springer, 2014.
- [3] Gocht, M.; Tynior, R.; Wunderlich, C.: Konstruktive und geotechnische Aspekte kleiner Wasserkraftwerke in China. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 29-35.
- [4] Hassinger, R.: Lockstrompumpen - Einsatzkonzept und Erfahrungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der BWaStr - Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen - Herausforderung, Untersuchungsmethoden, Lösungsansätze. 12. und 13. Juni 2012 (<https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/07-HassingerLockstrompumpen.pdf>; Abruf 01.03.2019).
- [5] Karimanzira, D.; Rauschenbach, T.: Optimale Betriebsführung von Kleinwasserkraftwerks-Gruppen. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 43-50.
- [6] Merta, M.; Sommer, H.: Hydrologische Modellierung für die Optimierung von Kleinwasserkraftwerkskaskaden. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 22-28.
- [7] Pelikan, B.: Handbuch zur Planung und Errichtung von Kleinwasserkraftanlagen. ESHA 2004.
- [8] Rauschenbach, T.: Bewertung und Verbesserung von Kleinwasserkraftwerken in China. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 12-15.
- [9] Roland, F.: Leistungsplanbasierte Variantenanalyse zur Wasserkraftnutzung. In: Kasseler Wasserbau Mitteilungen (2013), Heft 19.
- [10] Tettenborn, F.; Sartorius, C.: Nachhaltigkeitsbewertung für Kleinwasserkraftwerke in China. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 6, S. 16-21.
- [11] Theobald, S.: Schlussbericht zum FuE-Verbundvorhaben HAPPI des Projektpartners Universität Kassel. Kassel, 2018.
- [12] Theobald, S; Klein, B.: Hybride Modellierung zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse an einer Wasserkraftanlage. In: Wasserkraft & Energie (2016), Heft 3, S. 2-12.

Klaus Träbing, Sarah Dickel and Stephan Theobald

#### Hydraulics and optimization of small hydropower sites in China

The optimization of small hydropower sites is a challenging planning task. Modern methods like hydrodynamic-numerical modelling for the analysis of flows and advanced tools for site analysis and optimization are used to improve selected energetic, stream ecological and economic aspects. Site examples from China illustrate the applicability of these methods in specific local situations. Procedures applied to improve planning results are described in detail in practically oriented guidelines.



#### Strömungsanalyse



Altwater, C. S.: Bestimmung von Rechenverlusten mittels numerischen Strömungsanalysen. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 10/2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. [www.springerprofessional.de/link/15098174](http://www.springerprofessional.de/link/15098174)

Fischer, J.; et al.: Fischlifte und Fischschleusensysteme. In: Biologische Durchgängigkeit von Fließgewässern. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. [www.springerprofessional.de/link/11978556](http://www.springerprofessional.de/link/11978556)