

Der Hongrin-Staudamm.

Bild: FMHL

Wege zu flexibleren und nachhaltigeren Kraftwerken

Modernisierung der Schweizer Wasserkraft im Zeitalter der Energiewende

Elena Vagnoni

Die Wasserkraft ist eine zentrale Säule der Schweizer Stromversorgung, denn sie liefert heute mehr als die Hälfte des inländischen Stroms und spielt eine entscheidende Rolle bei der Integration von intermittierenden erneuerbaren Energien wie Windkraft und Solarstrom. Im Rahmen der Energiestrategie 2050 soll die Wasserkraftproduktion um weitere rund 5 % auf etwa 38,6 TWh steigen.

Doch diese Säule des Energiesystems steht vor mehreren grossen Herausforderungen. In den nächsten dreissig Jahren werden fast 65 % der Schweizer Wasserkraftproduktion

von der Erneuerung der Wasserkraftkonzessionen betroffen sein. Diese Verfahren setzen komplexe technische, ökologische und regulatorische Bewertungen ein. Gleichzeitig müssen sich die Kraftwerke an ein Stromnetz im Umbruch anpassen, das durch schnelle Lastschwankungen, einen steigenden Bedarf an Systemdienstleistungen und verschärfte Umweltauflagen gekennzeichnet ist.

Dabei geht es nicht nur darum, die Stromproduktion aufrechtzuerhalten und zu steigern, sondern auch darum, den Betrieb der

IN
KÜRZE



Anlagen zu optimieren, um deren Flexibilität, Zuverlässigkeit und Umweltverträglichkeit zu verbessern.

Das Projekt HydroLEAP

Das Pilot- und Demonstrationsprojekt HydroLEAP wurde konzipiert, um neue technologische und betriebliche Lösungen zu entwickeln und zu demonstrieren, mit denen die Flexibilität, Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit der Schweizer Wasserkraftwerke gestärkt wird. Es brachte acht Partner aus Wissenschaft und Industrie zusammen. Die Forschung wurde von der ETH Lausanne (EPFL) geleitet, die für die wissenschaftliche Koordination zuständig war, sowie von der ETH Zürich und der HES-SO Valais-Wallis. Zu den Industriepartnern gehörten Alpiq, FMV (Forces Motrices Valaisannes), Hydro-Exploitation, Hydropower Dynamics Engineering und das Wasserkraftprojekt Massongex-Bex-Rhône. Finanziert wurde das Projekt vom BFE. Es lief über fast fünf Jahre bis September 2025.

Die Projektarchitektur basiert auf drei Demonstrationsanlagen, die unterschiedliche Situationen repräsentieren:

- Das Pumpspeicherkraftwerk Forces Motrices Hongrin-Léman (FMHL) ermöglicht die Untersuchung neuer flexibler Betriebsmodi im grossen Massstab.
- Das Laufwasserkraftwerk KW Ernen im Wallis dient als Fallstudie für die Hybridisierung mit Batterien und die Entwicklung von Werkzeugen zur prädiktiven Instandhaltung.
- Das Projekt Massongex-Bex-Rhône, das für eine Anlage mit geringer Fallhöhe vorgesehen ist, bietet ein ideales Umfeld für die Entwicklung von Lösungen zum Fischschutz und zum Sedimentmanagement.

Im Mittelpunkt dieses Ansatzes steht auch die Technologieplattform für Hydraulikmaschinen (PTMH) der EPFL, deren Modernisierung es ermöglicht hat, die Möglichkeiten für den Test von Hydraulikmaschinen erheblich zu erweitern.

Mehr Flexibilität, weniger Verschleiss

Die Entwicklung des Stromnetzes verändert die Betriebsbedingungen von Wasserkraftwerken stark. Ursprünglich für den Betrieb unter relativ stabilen Bedingungen konzipiert, sind diese heute häufigen dynamischen Belastungen ausgesetzt. Der steigende Anteil an erneuerbaren Energien erfordert schnelle Leistungsanpassungen, um das Gleichgewicht des Netzes aufrechtzuerhalten.

Zwar verfügen Wasserkraftwerke von Natur aus über eine hohe Regelbarkeit, doch kann ihr Betrieb ausserhalb der Nennbedingungen zu Leistungseinbussen und höheren mechanischen Belastungen führen. Phänomene wie Druckschwankungen, hydraulische Instabilitäten oder Fluid-Struktur-Wechselwirkungen können Schwingungen erzeugen

und die Ermüdung der Komponenten beschleunigen. Im Rahmen des Projekts konnten diese Phänomene auf verschiedenen Ebenen analysiert werden, indem numerische Simulationen, experimentelle Versuche und Messungen an realen Anlagen kombiniert wurden.

Von Simulationen zur prädiktiven Instandhaltung

Es wurden eindimensionale hydraulische Modelle entwickelt, um Transienten in Rohrleitungen und Zuführungsstollen zu untersuchen, insbesondere um Betriebsbedingungen zu identifizieren, die bei Übergängen zwischen den Betriebsmodi zu Druckstössen führen können. Diese Analysen wurden durch detaillierte dreidimensionale Simulationen (CFD, Computational Fluid Dynamics) ergänzt, mit denen die Strömungsstrukturen im Inneren der Maschinen sowie die Druckverluste in diversen Betriebskonfigurationen untersucht werden konnten.

Diese Studien wurden zudem mit einem digitalen Zwilling des hydraulischen Verhaltens der Kraftwerke gekoppelt: Hydro-Clone. Dieses Modell kombiniert physikalische Darstellungen des Hydrauliksystems mit Betriebsdaten aus dem Scada-System. Die Integration von Echtzeitdaten ebnet den Weg für fortschrittliches Monitoring und prädiktive Wartungsanwendungen.

Von Modellversuchen bis zu Messungen an realen Anlagen

Auch die Ermüdungserscheinungen bei Hydraulikmaschinen wurden experimentell untersucht. An verschiedenen Arten von Turbinen und mehrstufigen Pumpen wurden Versuche an Modellanlagen durchgeführt, um die Auswirkungen von transienten Betriebszuständen auf die mechanischen Beanspruchungen zu bewerten.

Parallel dazu wurde ein Hybridsystem untersucht, das eine Batterie mit der Hydraulikanlage kombiniert, um eine Lösung zu entwickeln, die den Verschleiss der Maschinen reduziert und die Systemleistungen für das Netz erhöht.

Diese Arbeiten wurden durch Modalanalysen und Transmissibilitätsmessungen an Maschinen in Originalgrösse ergänzt, um bestimmte Schwingungssignaturen zu identifizieren, die mit ungünstigen Betriebsbedingungen verbunden sind. Diese Methoden tragen zur Entwicklung nicht-intrusiver Überwachungsinstrumente bei.

Neben den rein mechanischen Aspekten stellen Sedimente im Wasser einen weiteren Verschleissfaktor dar. In gewissen alpinen Stauseen kann der Abrieb durch Feststoffpartikel zu einer fortschreitenden Erosion der hydraulischen Oberflächen führen. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten ermöglichten eine verbesserte Charakterisierung dieser Phänomene und die Untersuchung

verschiedener Betriebsstrategien zur Begrenzung der Erosionsauswirkungen.

All diese Arbeiten tragen zu einem besseren Verständnis der flexiblen Betriebsbedingungen von Wasserkraftwerken bei und helfen dabei, Strategien zu identifizieren, mit denen die Flexibilität erhöht und gleichzeitig der Verschleiss der Anlagen begrenzt werden kann.

Auf dem Weg zu neuen flexiblen Betriebsmodi

Die während des Projekts entwickelten Lösungen wurden an drei Demonstrationsanlagen validiert. Mit einer Nennleistung von 420 MW ist das Pumpspeicherkraftwerk Forces Motrices Hongrin-Léman eine der wichtigsten Pumpspeicheranlagen der Schweiz. Es spielt eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung des Stromnetzes, insbesondere bei der Erbringung von Systemdienstleistungen.

Vor diesem Hintergrund befasste sich das Projekt mit dem Betrieb im hydraulischen Kurzschluss, einem Betriebsmodus, bei dem Pumpe und Turbine gleichzeitig betrieben werden, um auch während der Pumpphase eine Regelreserve bereitzustellen. Die Analyse dieses Betriebsmodus erforderte eine detaillierte Untersuchung des hydraulischen Verhaltens des Systems.

Die Ergebnisse zeigen, dass bestimmte Konfigurationen eine Erhöhung der kontinuierlichen Regelkapazität der Anlage ermöglichen, während gleichzeitig ein Stillstand des Kraftwerks beim Übergang zwischen Pump- und Turbinenbetrieb vermieden wird. Sie schlagen zudem neue Anlaufkurven für die Dreiphasenaggregate vor, wodurch die Ermüdung der Laufräder um bis zu 15% reduziert werden kann.

Prädiktive Regelung und Hybridisierung mit Batterien

Das Laufwasserkraftwerk KW Ernen diente als Demonstrationsanlage für die Untersuchung der Hybridisierung zwischen Wasserkraftproduktion und elektrochemischer Speicherung. Durch die Integration eines Batteriespeichersystems können die für die Frequenzregelung nötigen schnellen Leistungsschwankungen aufgefangen werden, während die Turbinen die Hauptproduktion übernehmen.

Mit prädiktiven Regelungsmethoden konnten die Dimensionierung und die Nutzung des Speichersystems optimiert und gleichzeitig die Bewegungen der Leitschaufeln (Guide Vane Opening, GVO) der Turbinen reduziert werden. Dieser Ansatz trägt dazu bei, Druckschwankungen zu begrenzen und die Wasserkraftmaschinen nahe an ihrem optimalen Betriebspunkt zu halten.

Mit dem Einbau einer Batterie mit kleiner Kapazität – etwa 5% der Gesamtleistung des Kraftwerks – lässt sich die Regelleistung für das Stromnetz verdoppeln (Bild 1). Dieser Gewinn wird erzielt, ohne die Lebensdauer der Anlage zu verkürzen, ohne zusätzliche Wartungskosten (abgesehen von der Anfangsinvestition für die Batterie) und ohne erhöhtes Risiko für die elektromechanischen Komponenten.

Parallel dazu wurden fortschrittliche Diagnosemethoden entwickelt, um die Überwachung der Anlagen zu verbessern. Die Analyse des Schwingungsgehalts der gemessenen Signale ermöglichte die Definition eines spezifischen Indikators, des sogenannten Vibration Content Index, mit dem bestimmte Betriebszustände identifiziert werden können, die die Ermüdung der Komponenten beschleunigen.

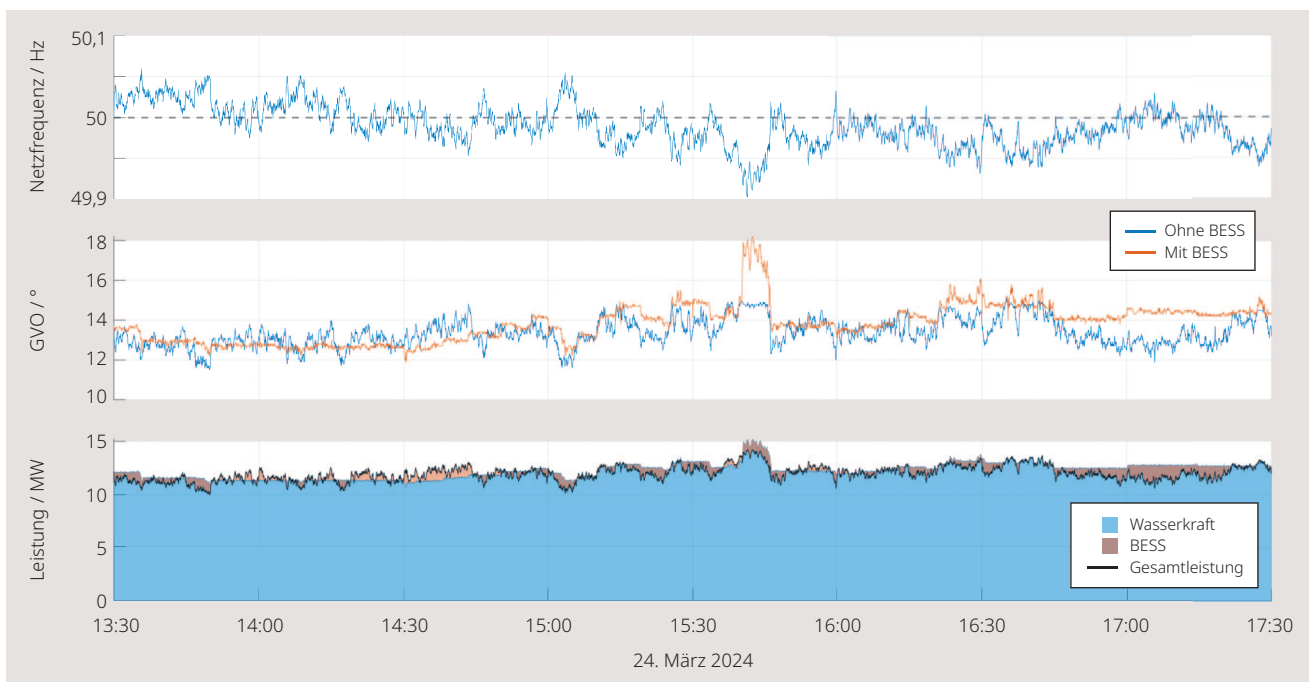


Bild 1 Auslegung des Wasserkraftwerks Ernen: Reaktion einer Wasserkraftturbine im Vergleich zu einem Hybridsystem bei einem Szenario mit variabler Leistungsvorgabe über 4 Stunden und doppelter Regelungsleistung.

Bild: EPFL-PTMH

nigen könnten. Es wurden zudem virtuelle Sensoren auf Basis von Methoden des maschinellen Lernens entwickelt, um gewisse Anomalien im Zusammenhang mit Kavitation oder Erosion früh zu erkennen.

Fischschutz und Sedimentmanagement

Das Projekt Massongex-Bex-Rhône konzentrierte sich auf die ökologischen Herausforderungen bei Niederdruckkraftwerken, insbesondere auf die Konzeption von Fischschutzsystemen und die Analyse der Strömungsverhältnisse bei den Wassereinlaufgittern. Mit numerischen Simulationen wurde der Einfluss der Geometrie der Gitter und der Umleitungsvorrichtungen auf die Strömung bewertet.

Diese Analysen wurden durch experimentelle Versuche ergänzt, die in einem für ethohydraulische Studien vorgesehenen Wasserkanal an der ETH Zürich durchgeführt wurden. Mit diesen Versuchen konnte das Verhalten verschiedener Fischarten unter kontrollierten Strömungsbedingungen beobachtet und die Wirksamkeit mehrerer Leiteinrichtungen bewertet werden.

Die Arbeiten befassten sich zudem mit dem Sedimenttransport und der Bewertung des Erosionsrisikos für Turbinen. Anhand von Messungen der Konzentration von Schwebstoffen wurden Modelle entwickelt, um die Auswirkungen dieser Partikel auf die Lebensdauer der Anlagen abzuschätzen und geeignete Betriebsstrategien für Ereignisse mit hoher Sedimentfracht festzulegen.

Einzigartige Versuchsplattform

Ein Schlüsselement des HydroLEAP-Projekts war die Modernisierung der Technologieplattform für Hydraulikmaschinen (PTMH) der EPFL. Seit ihrer Gründung im Jahr 1969 ist diese Infrastruktur eines der weltweit führenden Zentren für die experimentelle Untersuchung von Hydraulikmaschinen.

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Prüfstände komplett modernisiert, um neue Betriebskonzepte untersuchen zu können. Ein Prüfstand (Bild 2) wurde angepasst, um Pelton turbinen im verkleinerten Massstab gemäss internationalen Normen zu testen. Diese Anlage ermöglicht insbesondere die Untersuchung von Übergangszuständen wie Schnellstarts oder Notabschaltungen.

Ein zweiter Prüfstand wurde verbessert, um transiente Phänomene in verschiedenen Arten von Wasserkraftmaschinen zu analysieren, während ein dritter Versuchsstand nun über ein Batteriespeichersystem und einen Stromnetzsimulator verfügt. Mit dieser Konfiguration kann die Hybridisierung

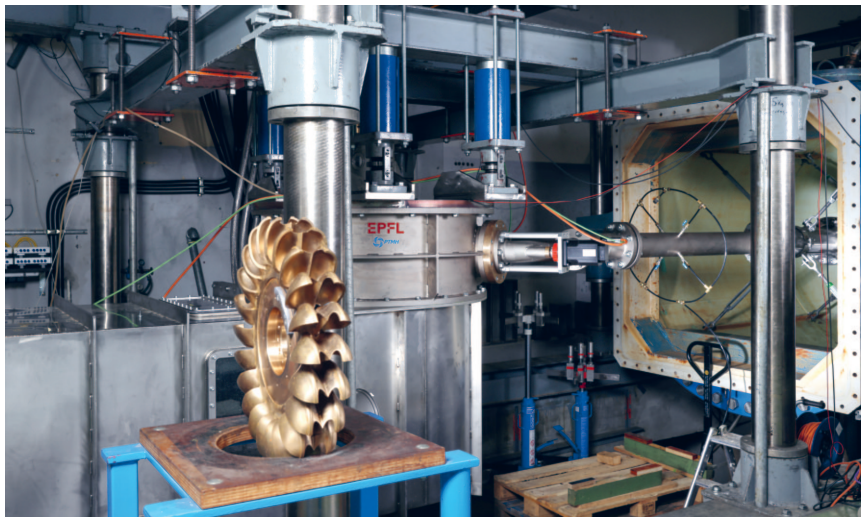


Bild 2 Modernisierte Versuchsplattform für dynamische Tests an Wasserturbinen am PTMH (EPFL).

Bild: EPFL-PTMH

zwischen Wasserkraftwerken und Speichersystemen untersucht werden.

Diese Infrastrukturen bieten Forschern die Möglichkeit, realistische Betriebsbedingungen im Labor nachzubilden und neue Lösungen vor der Umsetzung in industriellen Anlagen schnell zu validieren.

Perspektiven für die Modernisierung des Schweizer Wasserkraftparks

Die im Rahmen von HydroLEAP erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Wasserkraft noch über ein erhebliches Innovationspotenzial verfügt. Die durchgeführten Arbeiten ermöglichten es, neue flexible Betriebsstrategien zu identifizieren, den Nutzen der Hybridisierung mit Batteriespeichersystemen zu bewerten und digitale Werkzeuge zur Verbesserung der Überwachung und Wartung der Anlagen zu entwickeln. Gleichzeitig tragen die Forschungen zum Fischschutz und zum Sedimentmanagement dazu bei, die Umweltverträglichkeit von Wasserkraftanlagen zu verbessern.

All diese Ergebnisse liefern konkrete Anhaltspunkte für die Modernisierung des Schweizer Wasserkraftparks und die Anpassung bestehender Anlagen an die neuen Anforderungen des Stromnetzes.

Vor dem Hintergrund der Energiewende und sich wandelnder Betriebsbedingungen zeigen diese Arbeiten, dass die Wasserkraft weiterhin eine zentrale Rolle in einem zuverlässigen und weitgehend auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem spielen kann.

Literatur

> HydroLEAP final report:
www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=73996&Load=true

Autorin

Dr. Elena Vagnoni ist wissenschaftliche Leiterin der Technologieplattform für Hydraulikmaschinen an der EPFL.
> EPFL, 1007 Lausanne
> elena.vagnoni@epfl.ch