



dossier.

Neue Fragen bei der Wasserkraft

Forschungsthemen | Der Umbau des Energiesystems wirkt sich auch auf die Anforderungen aus, die an die Wasserkraft gestellt werden. Neue, dynamischere Betriebsarten laden dazu ein, bewährte Technologien zu überdenken.

Évolution de l'hydroélectricité

Thèmes de la recherche | La transformation du système énergétique a également un impact sur les exigences imposées à l'énergie hydraulique. De nouveaux modes d'exploitation plus dynamiques invitent à repenser des technologies éprouvées.

RADOMÍR NOVOTNÝ

Seit über einem Jahrhundert verlässt sich die Schweizer Energiewirtschaft auf die Wasserkraft, die den grössten Anteil an der Elektrizitätsbereitstellung liefert. In diesem langen Zeitraum wurden hydraulische Kraftwerkskomponenten kontinuierlich verbessert. Heute ist das Optimum beim Wirkungsgrad im nominalen Betrieb praktisch erreicht. Grund genug, die energietechnischen Forschungsaktivitäten auf weniger ausgereifte Technologien zu verlagern. Beispielsweise sucht man im Programm der Energy Week der ETH Zürich, die vom 5. bis 11. Dezember 2022 in Zürich stattfand, den Ausdruck «Wasserkraft» vergebens. Da werden Netto-Null-Energieszenarien diskutiert, die Rolle der Gebäude untersucht, die Sektorkopplung als Schlüsselement der Energiewende angepriesen und der Betrieb einer sicheren Netzinfrastruktur vorgestellt.

Dies sind zweifellos wichtige Themen. Aber ganz ausgeblendet sollte die Wasserkraft nicht werden, denn es gibt noch offene Fragen. Es gilt zu erforschen, wie sich ihre Rolle in der Transition zu einem nachhaltigeren Energiesystem verändert und welche Anpassungen nötig sind, damit sie die neue Rolle zuverlässig erfüllt. Diese Fragen sind besonders in Europa wichtig, wo das Wasserkraftpotenzial fast ausgeschöpft und wo bewährte Anlagen gelegentlich mit Retrofits aktualisiert werden. Denn als zentrales Element wird auch die Wasserkraft, insbesondere Pumpspeicherkraftwerke, wegen des wachsenden Anteils an fluktuierenden erneuerbaren Stromquellen ihren Betrieb anpassen müssen – und wird dadurch vor neue Herausforderungen gestellt. Statt einmal täglich mit Atomstrom in der Nacht zu pumpen, dürften Pumpspeicherkraftwerke beispielsweise im Sommer mehrmals täglich aktiviert werden, um überschüssigen Solarstrom sinnvoll nutzen zu können. Ein Betrieb, für den die Pumpturbinen ursprünglich nicht ausgelegt wurden.

Dynamische Belastungen häufen sich

Hydraulische Pumpen und Turbinen arbeiten im vorgesehenen Arbeitspunkt effizient und mit langer Lebensdauer. Das Aufstarten, ein Lastabwurf oder ein Teillastbetrieb vor dem Synchronisieren sind aber problematisch, da die hydraulischen Komponenten einen Arbeitsbereich durchqueren müssen, in dem oft Instabilitäten auftreten. Für Turbinen ist dies weniger kritisch, aber für Pumpturbinen schon. Die Vibrationen und Schwingungen belasten die mechanischen Teile enorm und führen zu einer deutlich verkürzten Lebensdauer des Laufrads – wenn nicht ein Schaden die Nutzungsdauer noch abrupter beendet.

Der neue Einsatz in dynamischeren Energiesystemen wirft Fragen auf: Wie wirkt sich die markante Zunahme der Betriebswechsel auf die Pumpturbinen aus? Mit welchen Massnahmen können die schädlichen Auswirkungen minimiert werden? An Antworten wird in diversen Ländern gearbeitet, in der Schweiz unter anderem an der Hochschule Luzern (HSLU), wo sich Dr. Sabri Deniz, Professor am Institut für Maschinen- und Energietechnik, mit Fragen der Fluidmechanik befasst.

Sein Team untersucht, wie sich Instabilitäten in Pumpturbinen eliminieren lassen. Dabei setzen sie auf eine aktive

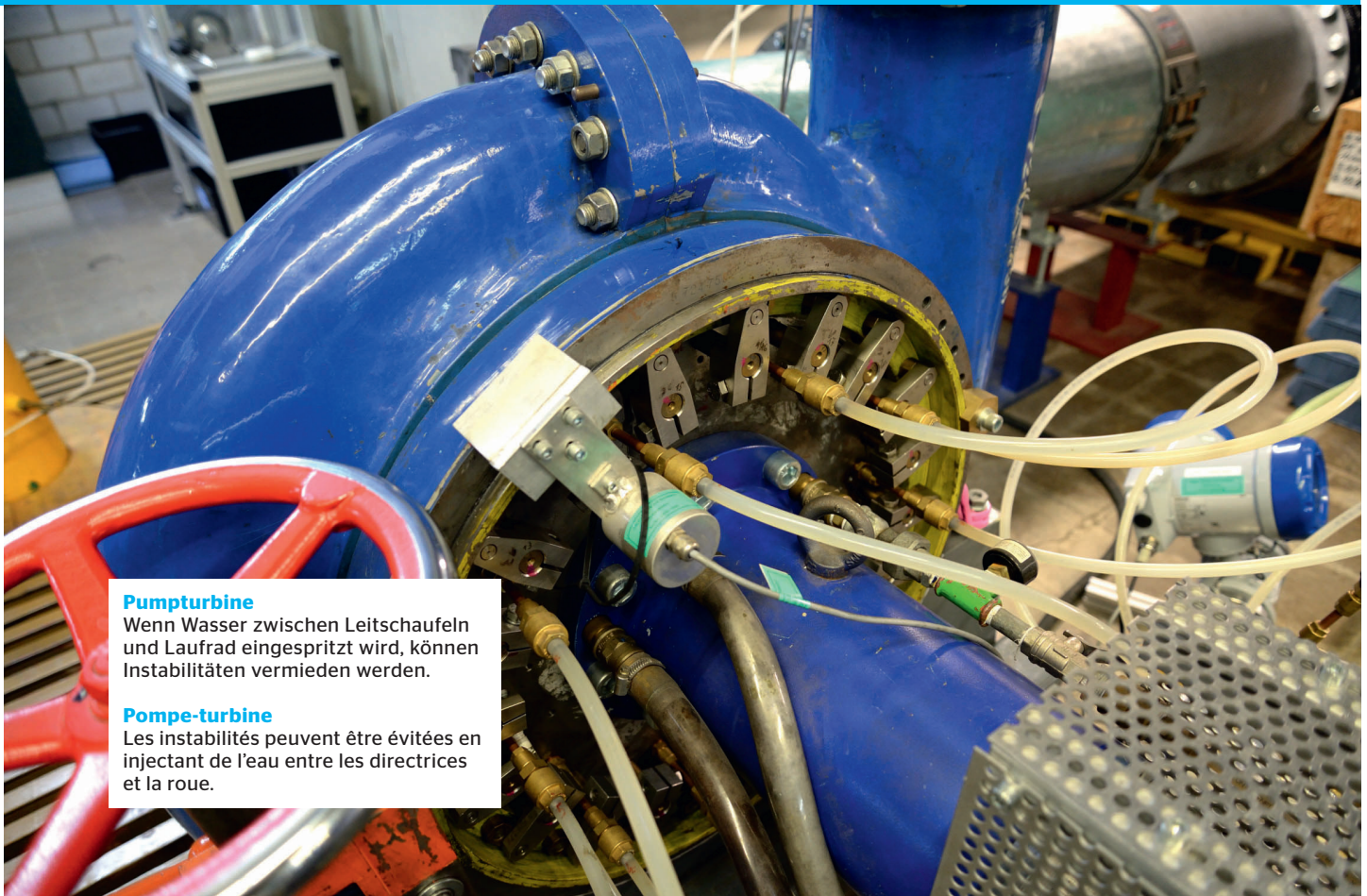
De puis plus d'un siècle, le secteur énergétique suisse repose sur l'énergie hydraulique, qui fournit la majeure partie de l'électricité produite en Suisse. Au fur et à mesure des décennies, les composants hydrauliques des centrales ont été continuellement améliorés. Aujourd'hui, le rendement optimal en fonctionnement nominal est pratiquement atteint. Une raison suffisante pour réorienter les activités de recherche en matière d'énergie vers des technologies moins matures. Par exemple, le terme «énergie hydraulique» ne figurait nulle part dans le programme de l'Energy Week de l'ETHZ, qui a eu lieu du 5 au 11 décembre 2022 à Zurich. Il y a été question de scénarios énergétiques zéro net, du rôle des bâtiments, du couplage des secteurs en tant qu'élément clé de la transition énergétique, ou encore de l'exploitation d'une infrastructure de réseau sûre.

Il s'agit sans aucun doute de thèmes importants. Mais l'énergie hydraulique ne devrait pas être totalement occultée, car il reste des questions en suspens. Il est nécessaire d'étudier dans quelle mesure son rôle doit évoluer dans le contexte de la transition vers un système énergétique plus durable et quelles adaptations sont nécessaires pour qu'elle puisse remplir ce nouveau rôle de manière fiable. Ces questions sont particulièrement importantes en Europe, où le potentiel hydroélectrique est presque épuisé, et où des installations éprouvées sont modernisées et certains éléments remplacés. En effet, en tant qu'élément essentiel de l'approvisionnement en électricité, l'énergie hydraulique – et notamment les centrales de pompage-turbinage – devra également adapter son exploitation en raison de la part croissante de sources d'énergie renouvelables fluctuantes, et sera donc confrontée à de nouveaux défis. Au lieu de pomper de l'eau une fois par jour avec de l'électricité nucléaire pendant la nuit, les centrales de pompage-turbinage devront, par exemple, être activées plusieurs fois par jour en été afin de pouvoir utiliser judicieusement la production photovoltaïque excédentaire. Un mode d'exploitation pour lequel les pompes-turbines n'ont pas été conçues à l'origine.

Les contraintes dynamiques se multiplient

Les pompes et turbines hydrauliques fonctionnent efficacement au point de travail prévu et ont une longue durée de vie. Le démarrage, un délestage ou un fonctionnement à charge partielle avant la synchronisation sont toutefois problématiques, car les composants hydrauliques doivent traverser une zone de travail dans laquelle des instabilités apparaissent souvent. Si cela n'est pas très critique pour les turbines, ça l'est pour les pompes-turbines. Les vibrations et les oscillations sollicitent énormément les pièces mécaniques et réduisent nettement la durée de vie de la roue – pour autant qu'aucun dégât ne mette fin encore plus brutalement à son utilisation.

La nouvelle exploitation de l'énergie hydraulique en tant que partie intégrante d'un système énergétique plus dynamique soulève diverses questions: quel est l'impact de l'augmentation significative des cycles d'exploitation



Pumpturbine

Wenn Wasser zwischen Leitschaufeln und Laufrad eingespritzt wird, können Instabilitäten vermieden werden.

Pompe-turbine

Les instabilités peuvent être évitées en injectant de l'eau entre les directrices et la roue.

Unterdrückung von Instabilitäten mittels Einspritzung von Wasser oder Luft in das kritische Gebiet, den unbeschauften Raum zwischen Leitschaufeln und Laufrad. Das Einspritzen wird aktiviert, wenn ein problematisches Strömungsverhalten auftritt. Sobald die Pumpe-turbine im Normalbetrieb ist, wird die aktive Unterdrückung ausgeschaltet. Im Vergleich zu passiven Methoden wie Stabilisierungsflügeln, geometrischen Anpassungen der Wand mit J-Fugen oder Ähnlichem, die auch in der Lage sind, Instabilitäten zu unterdrücken, haben aktive Methoden den Vorteil, dass sie den Wirkungsgrad im Normalbetrieb nicht reduzieren.

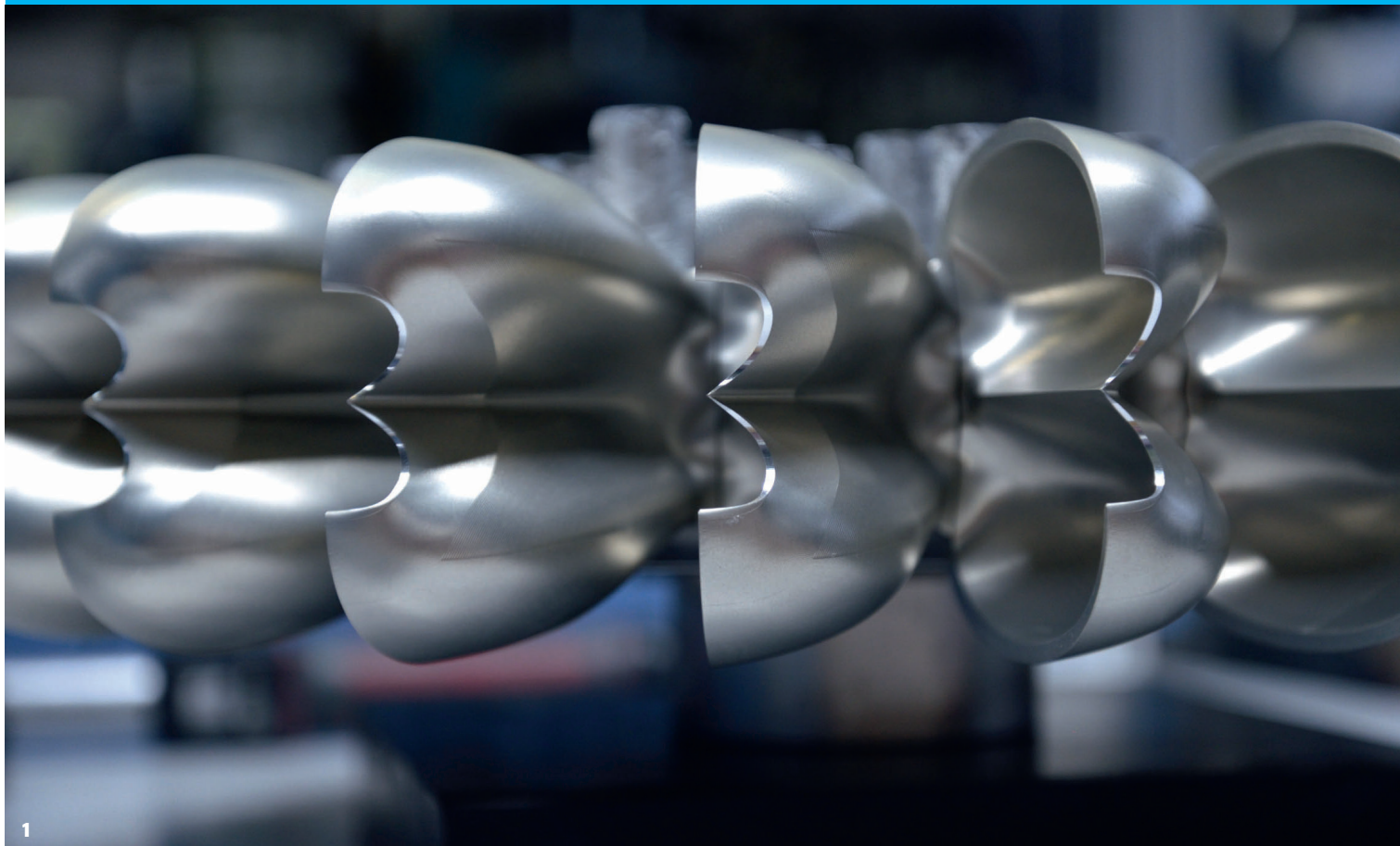
Diverse aktive Optionen zur Verbesserung der Kennlinie bei Pumpen und Turbinen werden an der HSLU getestet: Bei der Einspritzung wurde zunächst mit Erfolg eine externe Energiequelle verwendet. Dann wurde untersucht, ob es nicht möglich wäre, mittels Bypass das eigene Wasser der Turbine zu verwenden. Da war der positive Effekt kleiner. Diese Methoden ermöglichen einen Betrieb unter Teillast, was früher nicht möglich war.

An der HSLU wurde ebenfalls untersucht, ob die Unterdrückung mittels Einspritzung bereits ab dem Startvorgang aktiv sein soll, oder ob es genügt, sie erst zu aktivieren, wenn Instabilitäten auftreten. Fazit: Wenn die Einspritzung bereits ab dem Start eingesetzt wird, können keine Überraschungen auftreten – beispielsweise durch Asymmetrien der Strömung, die Instabilitäten in sonst stabilen Arbeitspunkten verursachen. Man braucht also mehr Energie, ist dafür auf der sicheren Seite bezüglich Instabilitäten.

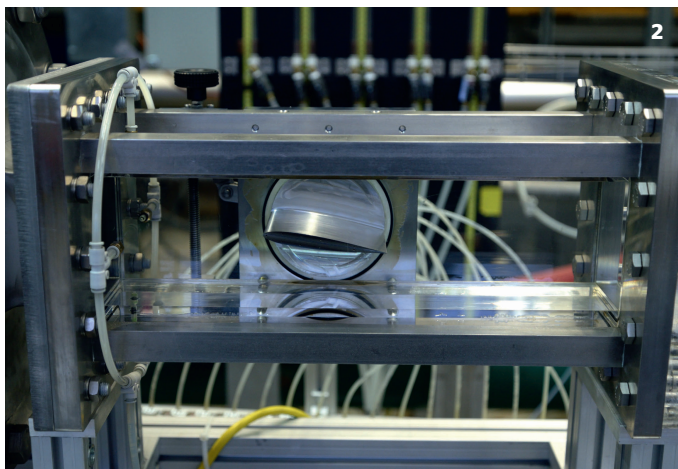
sur les pompes-turbines? Quelles mesures peuvent être prises pour minimiser les effets néfastes? Des chercheurs s'emploient à trouver des réponses dans divers pays, en Suisse entre autres à la Haute école de Lucerne (HSLU), où Sabri Deniz, professeur à l'Institut de génie mécanique et énergétique, consacre ses recherches à la mécanique des fluides.

Son équipe cherche à éliminer les instabilités dans les pompes-turbines. Pour cela, elle mise sur une suppression active des instabilités au moyen d'une injection d'eau ou d'air dans la zone critique, c'est-à-dire dans l'espace entre les directrices et la roue. L'injection est activée en cas d'apparition d'un comportement d'écoulement problématique. Dès que la pompe-turbine atteint à nouveau un fonctionnement normal, l'injection d'eau ou d'air est désactivée. Comparées aux méthodes passives telles que les adaptations géométriques de la paroi avec des joints en J ou autres, qui sont également capables de supprimer les instabilités, les méthodes actives ont l'avantage de ne pas réduire le rendement en fonctionnement normal.

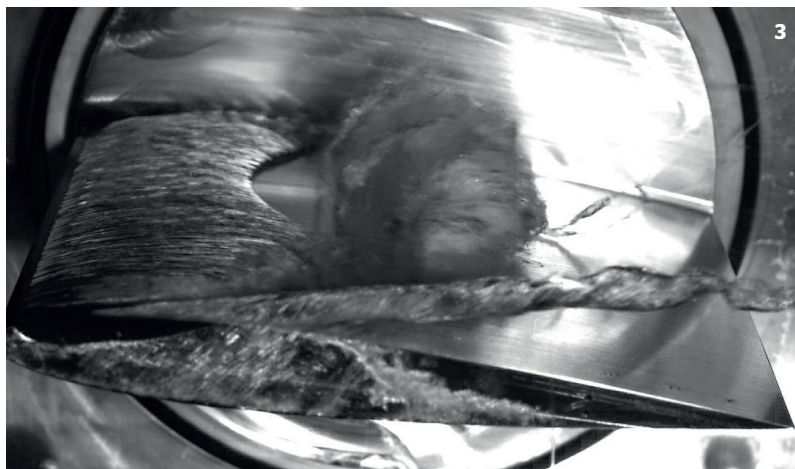
Diverses options actives visant à améliorer la courbe caractéristique des pompes et des turbines sont testées à la HSLU: pour l'injection, une source d'énergie externe a d'abord été utilisée avec succès. Ensuite, la question a été de savoir s'il était possible d'utiliser l'eau de la turbine au moyen d'un by-pass, cette fois avec un effet positif restreint. Ces méthodes permettent un fonctionnement à charge partielle, ce qui n'était pas possible auparavant.



1



2



3

1 Ein Peltonrad für Wirkungsgradmessungen. Schrittweise werden die kritischen Stellen abgeschliffen, um die Erosion nachzubilden.

Une roue Pelton pour les mesures de rendement. Les endroits critiques sont progressivement abrasés afin de reproduire l'érosion.

2 Prüfstand zur Untersuchung von Kavitationseffekten bei axialen Laufrädern.

Banc d'essai pour l'étude des effets de la cavitation sur les roues axiales.

3 Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Kavitation und der Wirbelbildung bei einem sehr kleinen Spalt zwischen Flügel und Plexiglaswand.

Photographie à haute vitesse de la cavitation et de la formation de tourbillons dans un très petit espace entre la pale et la paroi en plexiglas.

Forschungstrends bei Turbinen

Es wird heute aber nicht nur am Teillastbetrieb geforscht, sondern auch an der Optimierung von Turbinen. Dies geschieht hauptsächlich in Norwegen, wo der Anteil der Wasserkraft an der Energiebereitstellung deutlich höher ist als in der Schweiz, aber auch an der EPFL und der HES-SO Wallis. Dabei stehen Hochdruckanlagen im Fokus, bei denen aus wirtschaftlichen Gründen höhere Gefälle realisiert werden sollen. Stellte früher eine Fallhöhe von rund 600 m für Francis- und Pumpturbinen einen Weltrekord dar, werden heute schon etwa 800 m erreicht. Würden früher für diese enormen Fallhöhen ausschliesslich Peltonturbinen verwendet, geht nun der Trend in Richtung Francisturbinen.

Obwohl Peltonturbinen eine ausgereifte Technologie darstellen – ihr Wirkungsgrad erreicht bis 95% –, wird immer noch an ihnen geforscht. Die grösste aktuelle Herausforderung ist die Erosion. Früher kannte man dieses Problem in der Schweiz kaum, da immer sauberes Wasser zur Verfügung stand. Die Forschung befasste sich mit Situationen in Ländern wie Indien und Nepal, wo die Laufräder nach einem Jahr von den Sedimenten so stark abgenutzt waren, dass sie ersetzt werden mussten. Aber nun mit dem klimabedingten Rückzug der Gletscher hat es auch in den hiesigen Stauseen viel mehr Sedimente und Steine. Dieses Erosionsproblem ist somit auch in der Schweiz angekommen. In Lausanne und in Sitten forscht man an der Vorhersage der Erosion, in Luzern befasst man sich mit der Frage, wie sich ohne Demontage der Turbine feststellen lässt, wann das Laufrad ersetzt werden soll. Durch systematisches Abschneiden von Material an exponierten Stellen der Becher wird die Erosion simuliert und der entsprechende Wirkungsgrad gemessen. Anhand des Wirkungsgrads lassen sich dann Aussagen über den Erosionszustand machen.

Bei diesen Versuchen werden vermehrt Hochgeschwindigkeitskameras eingesetzt, mit denen die Strömungen unter anderem von Düsenseite her beobachtet werden können. Damit lässt sich sagen, welche Auswirkung die Erosion auf die Strömung hat.

Kavitationsforschung

Bei Pumpen und Turbinen wird auch die Kavitation untersucht, weil sie das Oberflächenmaterial deformieren und beschädigen kann. Dazu hat das Labor der HSLU einen Prüfstand, der zwar kleiner als der Kavitations-Prüfstand der EPFL ist, aber mit dem sich axiale Laufräder untersuchen lassen. Früher wurde die Leckage beim Spalt untersucht, heute eher die Wirbelbildung bei sehr kleinem Spalt, denn da können ebenfalls Kavitationseffekte auftreten. Während der Experimente sorgt ein Wärmetauscher dafür, dass die Wassertemperatur konstant bleibt, denn der Kavitationseffekt ist temperaturabhängig. Bei der Suche nach der optimalen Spaltgrösse wurde der Spalt in den Versuchen schrittweise vergrössert und der Kavitationseinfluss untersucht. Feine Löcher auf dem Flügel ermöglichen Druckmessungen, und eine Hochgeschwindigkeitskamera unterstützt die Untersuchungen.

Les chercheurs de la HSLU ont également regardé si la suppression par injection devait être active dès le processus de démarrage ou s'il suffisait de l'activer lorsque des instabilités apparaissaient. Conclusion: si l'injection est activée dès le démarrage, aucune surprise ne peut survenir – par exemple à cause d'asymétries de l'écoulement qui provoquent des instabilités à des points de travail usuellement stables. On a donc besoin de plus d'énergie, mais on est à l'abri des instabilités.

Tendances de la recherche sur les turbines

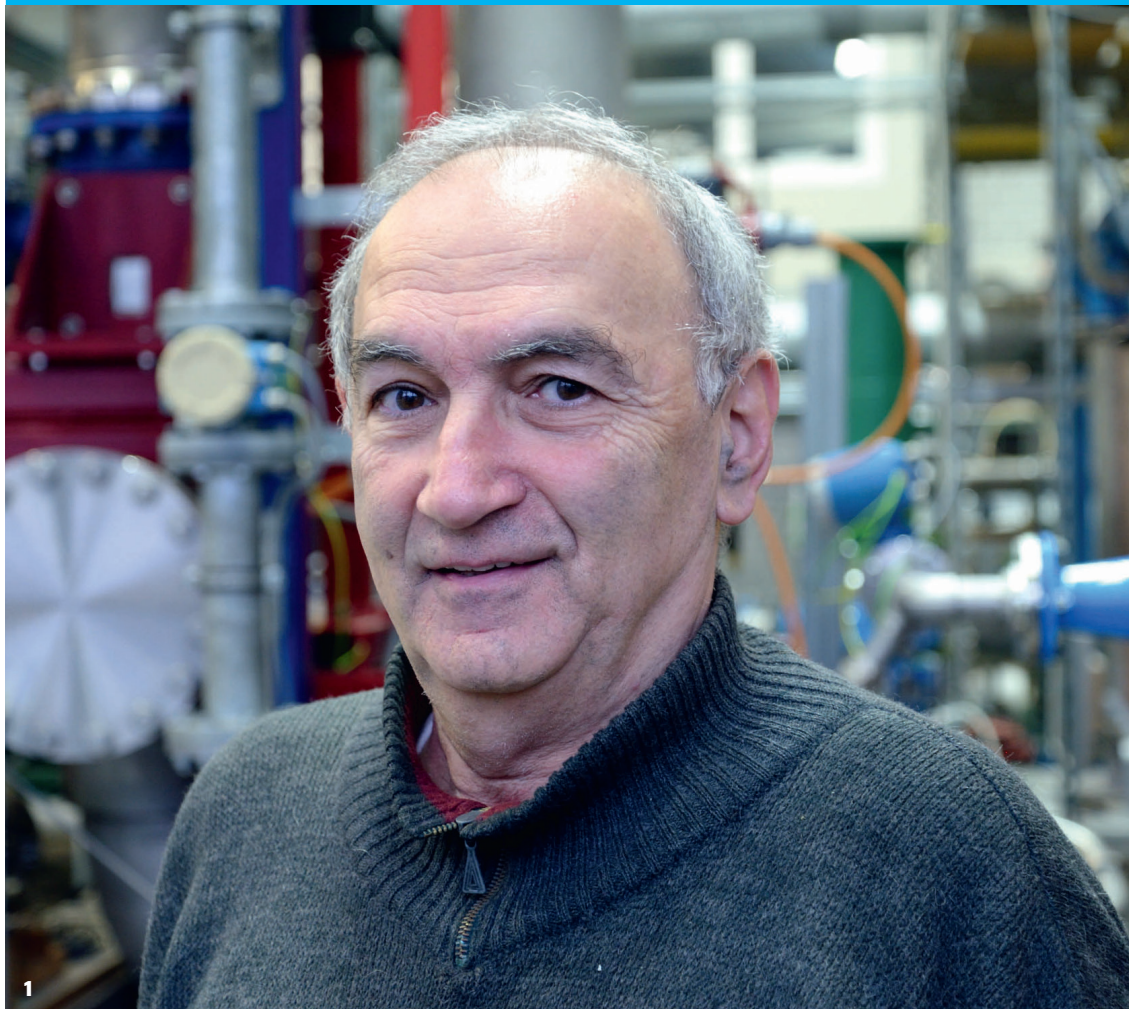
Aujourd'hui, les travaux de recherche ne portent pas seulement sur le fonctionnement à charge partielle, mais aussi sur l'optimisation des turbines. Et cela, principalement en Norvège, où la part de l'énergie hydraulique dans la production d'électricité est nettement plus élevée qu'en Suisse, mais aussi à l'EPFL et à la HES-SO Valais. L'accent est mis sur les installations à haute chute, pour lesquelles des chutes encore plus importantes doivent être réalisées pour des raisons économiques. Alors que le record mondial de hauteur de chute pour les turbines Francis et les pompes-turbines était autrefois de quelque 600 m, il atteint aujourd'hui déjà environ 800 m. Et si, auparavant, seules des turbines Pelton étaient utilisées pour ces énormes hauteurs de chute, la tendance évolue désormais vers les turbines Francis.

Même si la technologie des turbines Pelton est arrivée à maturité – leur rendement peut atteindre 95% – ces dernières font encore l'objet de travaux de recherche. Actuellement, l'érosion constitue le plus grand défi. Autrefois, on ne connaissait guère ce problème en Suisse, car il y avait toujours de l'eau propre à disposition. La recherche s'intéressait à des situations dans des pays tels que l'Inde et le Népal, où les roues étaient tellement usées par les sédiments au bout d'un an qu'elles devaient être remplacées. Mais désormais, avec le recul des glaciers, il y a aussi beaucoup plus de sédiments et de pierres dans nos lacs de barrage. Ce problème d'érosion est donc dorénavant également présent en Suisse. À Lausanne et à Sion, l'objectif des travaux de recherche consiste à prévoir l'érosion; à Lucerne, on se demande comment déterminer quand la roue doit être remplacée sans démonter la turbine. L'érosion y est simulée en enlevant systématiquement du matériau aux endroits exposés des augets, puis le rendement correspondant est mesuré. Ce dernier permet ensuite de tirer des conclusions sur l'état de l'érosion.

Lors de ces essais, des caméras haute vitesse sont de plus en plus fréquemment utilisées afin d'observer les écoulements, notamment depuis les injecteurs. Il est ainsi possible de déterminer l'effet de l'érosion sur l'écoulement.

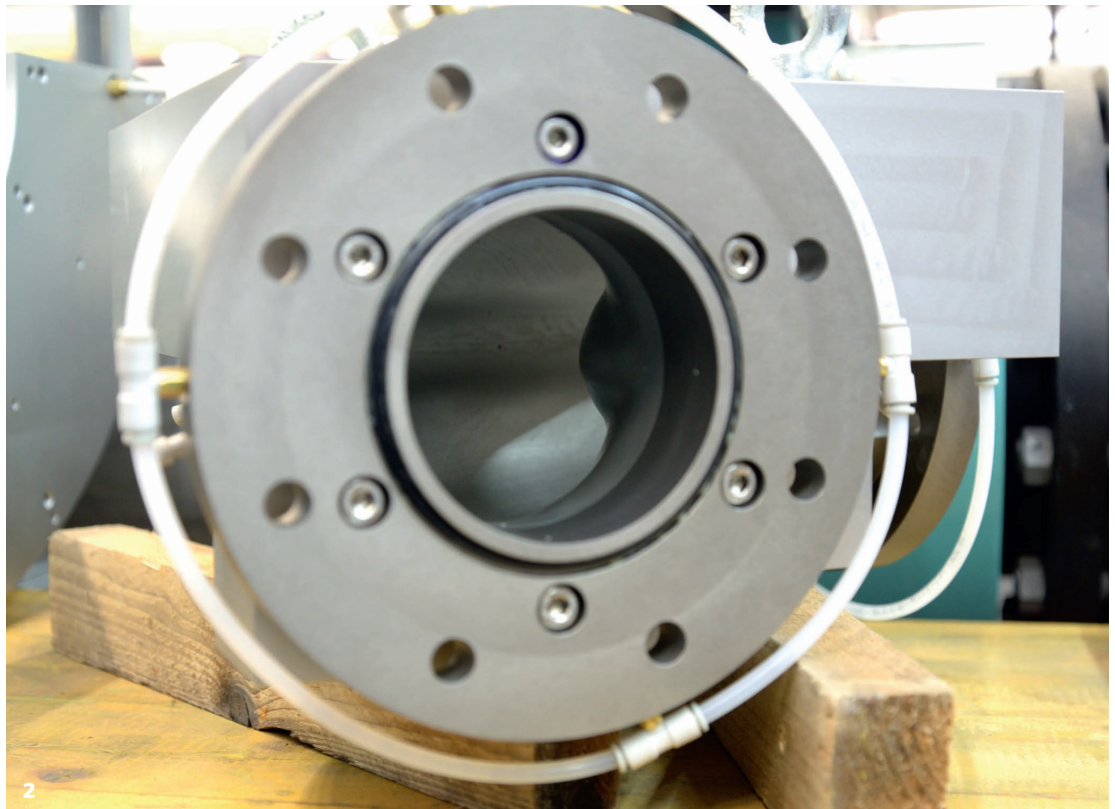
Recherches sur la cavitation

La cavitation constitue également un sujet de travaux de recherche pour les pompes et les turbines, car elle peut déformer et endommager le matériau de surface. Pour ce faire, le laboratoire de la HSLU dispose d'un banc d'essai, certes plus petit que le banc d'essai de cavitation de l'EPFL, mais qui permet d'étudier les roues axiales. Auparavant, on étudiait les fuites au niveau de l'espace entre la roue et la



1 Sabri Deniz ist seit 2012 Dozent an der HSLU. Er forscht am Design von hydraulischen und thermischen Strömungsmaschinen, um ihre Effizienz zu steigern und ihre Betriebsbereiche zu erweitern.

Sabri Deniz est chargé de cours à la HSLU depuis 2012. Il consacre ses recherches à la conception de turbomachines hydrauliques et thermiques afin d'améliorer leur efficacité et d'élargir leurs plages de fonctionnement.



2 Ein mit numerischen Strömungsberechnungen bezüglich hydraulischer Ablösungen optimierter Krümmer.

Un coude optimisé en matière de décollements hydrauliques à l'aide de la mécanique des fluides numérique.

Neue Entwurfsmethode

Numerische Strömungsberechnungen (Computational Fluid Dynamics, CFD) werden heute in der hiesigen Industrie für hydraulische Turbomaschinen (Pumpen und Turbinen) vermehrt für die Berechnung des Strömungsfeldes mit Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen und zur Bestimmung des Wirkungsgrades und der Leistung der Maschine mit genügender Genauigkeit eingesetzt. Der nächste Schritt bezüglich solcher Anwendungen ist, CFD nicht nur für die Analyse der Strömung, sondern auch für neue, bessere Designs oder Design-Modifikationen zu verwenden. Bekanntlich werden während des Designs von Turbomaschinen immer noch viele Erfahrungswerte bzw. empirische Korrelationen verwendet, welche auf früheren «guten» Designs basieren und sich von Firma zu Firma unterscheiden. Um diese Situation zu verbessern, hat der Pumpen-Experte Johann Gülich, der ein umfassendes Kreiselpumpenbuch verfasst hat, im Rahmen eines Innosuisse-Projektes für die Pumpenindustrie eine neue Design-Methode für Laufräder entwickelt. Das Ziel ist, neue Kreiselpumpen von Grund auf zu entwerfen, ohne Rückgriff auf bestehende Pumpen. Dieser Ansatz kann besonders bei neuen Anwendungsgebieten und unüblichen Materialien nützlich sein, bei denen die empirische Basis bescheiden ist. Die Methode wird mit numerischen Strömungsberechnungen unterstützt. Die neu hergestellten Pumpen-Laufräder wurden an der HSLU getestet.

Bei neuen Entwicklungen oder bei Design-Verbesserungen von Pumpen und Turbinen ist die Diskrepanz zwischen Aufwand und Nutzen heute ein grundsätzliches Problem. Gewisse Verbesserungen können zwar bezüglich des Wirkungsgrades oder der Betriebsbereich-Erweiterung noch erreicht werden, aber nur unter erheblichen Investitionen. Deshalb orientiert sich die Forschung nun um. An der ETH Zürich hat man die Abteilung für hydraulische Maschinen schon vor Längerem geschlossen und die Turbinenprüfstände der HSLU geschenkt. «Der Wettbewerb mit Fernost spielt auch eine Rolle», sagt Sabri Deniz, «denn am Ende nimmt man eine Pumpe (oder eine kleine Turbine wie PAT <Pumpe als Turbine>), die zwar einen um wenige Prozente geringeren Wirkungsgrad hat, aber deutlich preiswerter ist.»

Bei Windturbinen ist die Situation vergleichbar, es gibt aber eine einfachere Methode, um die Leistung zu steigern: Statt an strömungstechnisch besseren Windturbinen-Rotoren zu forschen, macht man sie einfach grösser. Die Windkraft hat den Vorteil, dass sich ein leicht schlechterer Wirkungsgrad mühelos mit einem grösseren Rotordurchmesser kompensieren lässt. Sabri Deniz: «Warum sollen sie sich bezüglich des Wirkungsgrades den Kopf zerbrechen? Die Leistung ist wichtig, ob sie mit kleinerem Wirkungsgrad erreicht wurde, interessiert Windturbinen-Betreiber nicht wirklich.»

Die Digitalisierung hält Einzug

Eine kleine Revolution für die Pumpenforschung ist das Additive Manufacturing. Laufräder und die dreidimensionale Geometrie von Eintritt bis Austritt lassen sich nun mit

paroi, aujourd'hui on s'intéresse plutôt à la formation de tourbillons lorsque l'espace est très petit, car des effets de cavitation peuvent également s'y produire. Lors des expériences, un échangeur de chaleur veille à ce que la température de l'eau reste constante, car la cavitation dépend de la température. Afin de déterminer la taille optimale de l'espace, celui-ci a été progressivement agrandi au cours des essais et l'influence sur la cavitation a été étudiée. Des trous fins sur la pale permettent de mesurer la pression, et une caméra haute vitesse est utilisée pour fournir des informations complémentaires.

Nouvelle méthode de conception

La mécanique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamics, CFD) est ici aujourd'hui de plus en plus utilisée dans l'industrie des turbomachines hydrauliques (pompes et turbines) pour calculer le champ d'écoulement avec les répartitions de pression et de vitesses, et pour déterminer le rendement et la puissance de la machine avec une précision suffisante. La prochaine étape, en ce qui concerne les applications de la mécanique des fluides numérique, consiste à utiliser cette dernière non seulement pour l'analyse de l'écoulement, mais aussi pour la création de nouveaux designs ou pour des modifications de conception. Il est bien connu que lors de la conception de turbomachines, on utilise encore beaucoup de valeurs ou de corrélations empiriques basées sur de «bons» designs antérieurs, qui diffèrent d'une entreprise à l'autre. Afin d'améliorer cette situation, l'expert en pompes Johann Gülich, auteur d'un livre détaillé sur les pompes centrifuges, a développé dans le cadre d'un projet Innosuisse une nouvelle méthode de conception de rotors pour l'industrie des pompes. L'objectif consiste à élaborer de nouvelles pompes centrifuges à partir de zéro, sans recourir à des pompes existantes. Cette approche peut être particulièrement utile pour les nouveaux domaines d'application et en présence de matériaux inhabituels pour lesquels la base empirique est limitée. Cette méthode repose sur des calculs de mécanique des fluides numérique. Les rotors de pompes nouvellement réalisés ont été testés à la HSLU.

L'écart entre les coûts et les bénéfices constitue aujourd'hui un problème fondamental lors de nouveaux développements ou d'améliorations de la conception de pompes et de turbines. Certaines améliorations peuvent certes encore être obtenues en termes de rendement ou d'extension de la plage de fonctionnement, mais seulement au prix d'investissements considérables. C'est la raison pour laquelle la recherche se réoriente désormais. L'ETHZ a fermé depuis longtemps son département de machines hydrauliques et a fait don de ses bancs d'essai de turbines à la HSLU. «La concurrence avec l'Extrême-Orient joue aussi un rôle», explique Sabri Deniz, «car on finit par prendre une pompe (ou une petite turbine comme PAT <pump as turbine>) qui a certes un rendement inférieur de quelques pourcents, mais qui est nettement moins chère.»

Pour les éoliennes, la situation est comparable, mais il existe une méthode plus simple pour augmenter la puissance: au lieu d'effectuer des travaux de recherche sur des rotors d'éoliennes plus performants en termes de techno-

dem 3D-Druck viel einfacher für Testzwecke herstellen, solange die Oberflächenrauigkeit den Vorgaben genügt. Früher war es sehr schwierig, gekrümmte Schaufeln mit Fünffachsenmaschinen zu schleifen. Kranz und Schaufeln wurden separat hergestellt und mussten verschweisst werden, was zu mechanischen Spannungen und entsprechenden Schäden führen konnte. Der 3D-Druck eliminiert heute viele dieser Probleme.

Durch numerische Simulationen, die nun mit leistungsfähigen Rechnern und Rechnerclustern möglich sind, kommt Bewegung in die Forschung. Man kann Strömungen, Wirkungsgrade oder Druckverteilungen bei komplexen Geometrien berechnen, um hydraulische Turbomaschinen zu optimieren. Sogar schnelle transiente Vorgänge wie Start/Stop, Lastwechsel oder Lastabwurf lassen sich simulieren. Dies war laut Sabri Deniz vor fünf Jahren an der HSLU noch nicht möglich.

Die Interaktion zwischen Berechnungen und Experimenten ist da auch wichtig. Mit der numerischen Strömungsmechanik wird die Strömung und Druckverteilung berechnet und mit der Finiten-Elemente-Methode verknüpft, um das Laufrad zu modifizieren. Man berechnet ein Laufrad, erhält die Druckverteilung und kann die mechanischen Belastungen und Spannungen ermitteln, um die Geometrie des Laufrads zu modifizieren. Anschliessend kann wieder beurteilt werden, ob das neue Design den gewünschten Zielen entspricht. Am zurzeit offenen Zwischenschritt, wie man von den Simulationsinformationen zum optimalen Design kommt, arbeitet man noch. Optimierungsprogramme mit Machine Learning könnten diese Lücke künftig füllen.

Immer noch in Bewegung

Die Wasserkraft ist bewährt. Da die Situation im Stromnetz aber wegen den volatil einspeisenden erneuerbaren Energiequellen schwieriger wird, erhält sie die Aufgabe, die Schwankungen zeitnah auszugleichen – mit Komponenten, die nicht dafür konzipiert wurden. Um dieser neuen Rolle gerecht zu werden, sind die erwähnten Forschungsanstrengungen nötig. Aktivitäten, die dazu einladen, mit neuen Tools wie 3D-Druck, Hochgeschwindigkeitskameras und fluiddynamischen Simulationen an neuen Lösungen für ein nachhaltiges Energiesystem zu arbeiten.

Literatur | Littérature complémentaire

- Ioannis Kougias, et al., «Analysis of emerging technologies in the hydropower sector», *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113, 2019.
- Sabri Deniz, Simon in Albon, «Modification of Pump Turbine Characteristics with Fluid Injection in Pump Operating Mode», ASME Turbo Expo 2022, Paper # GT2022-82884, 13.-17. Juni 2022, NL-Rotterdam.
- André Abgottspon, David Felix, Thomas Staubli, Robert Boes, «Betriebs- und Unterhaltsoptimierung von beschichteten Pelton turbinen mit hydro-abrasivem Verschleiss», *Wasser Energie Luft*, Heft 2, 2022, S. 105-117.



Autor | Auteur

Radomir Novotný ist Chefredaktor des Bulletins Electrosuisse.
Radomir Novotný est rédacteur en chef du Bulletin Electrosuisse.
 → Electrosuisse, 8320 Fehraltorf
 → radomir.novotny@electrosuisse.ch

logie d'écoulement, il suffit de les agrandir. L'énergie éolienne a l'avantage qu'un rendement légèrement inférieur peut être facilement compensé par un diamètre de rotor plus grand. Sabri Deniz ajoute: «Pourquoi se casser la tête avec le rendement? C'est la puissance qui est importante. Qu'elle ait été atteinte avec un rendement plus faible n'intéresse pas vraiment les exploitants d'éoliennes.»

La numérisation fait son entrée

La fabrication additive (additive manufacturing) fait office de petite révolution dans le domaine de la recherche sur les pompes. Les roues et la géométrie tridimensionnelle de l'entrée à la sortie peuvent désormais être fabriquées beaucoup plus facilement par impression 3D à des fins de test, tant que la rugosité de la surface répond aux spécifications. Auparavant, il était très difficile de rectifier des augets incurvés avec des machines à cinq axes. La couronne et les augets étaient fabriqués séparément et devaient être soudés, ce qui pouvait entraîner des tensions mécaniques et les dommages correspondants. Aujourd'hui, l'impression 3D élimine bon nombre de ces problèmes.

Les simulations numériques, désormais réalisables grâce à des ordinateurs et des clusters d'ordinateurs performants, font bouger la recherche. Il est possible de calculer des écoulements, des rendements ou des répartitions de pression pour des géométries complexes afin d'optimiser les turbomachines hydrauliques. Il est même possible de simuler des processus transitoires rapides comme le démarrage/l'arrêt, le changement de charge ou le délestage. Selon Sabri Deniz, cela n'était pas encore possible à la HSLU il y a cinq ans.

L'interaction entre calculs et expériences est là aussi importante. La mécanique des fluides numérique permet de calculer l'écoulement et la répartition de pression, et de les relier avec la méthode des éléments finis afin de modifier la roue. On calcule une roue, on obtient la répartition de pression, et on peut déterminer les charges et les tensions mécaniques afin de modifier la géométrie de la roue. Ensuite, on peut à nouveau évaluer si le nouveau design correspond aux objectifs souhaités. L'étape intermédiaire, qui consiste à passer des informations obtenues par le biais de la simulation au design optimal, fait encore l'objet de recherches. Des programmes d'optimisation reposant sur l'apprentissage automatique (machine learning) pourraient combler cette lacune à l'avenir.

Toujours en mouvement

L'énergie hydraulique a fait ses preuves. Mais comme la situation du réseau électrique devient plus délicate du fait de l'injection d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables volatiles, elle se voit confier la tâche de compenser rapidement les fluctuations – avec des composants qui n'ont pas été conçus pour cela. Pour assumer ce nouveau rôle, les travaux de recherche mentionnés sont nécessaires. Des activités qui invitent à travailler sur de nouvelles solutions pour un système énergétique durable à l'aide de nouveaux outils tels que l'impression 3D, les caméras haute vitesse et les simulations fluidodynamiques.