

Neues Laufrad Kraftwerk Krippau während der Fertigmontage (Abb. 2)



Foto: VERBUND

## DIGITALE ZWILLINGE ZUR RESTLEBENSDAUER-SIMULATION IN STEIRISCHEN WASSERKRAFTWERKEN

Bereits seit 2017 arbeitet VERBUND im Innovations- und Digitalisierungsprogramm „Digitales Wasserkraftwerk“ an der Nutzbarmachung von vielversprechenden weiteren Digitalisierungsmöglichkeiten für die Wasserkraft. Die Palette der sich bietenden technologischen Möglichkeiten ist äußerst vielfältig und umfasst seit der ersten Stunde auch die Vision eines digitalen Zwillings, der je nach Maschinen-Betriebsweise unmittelbar auch die Auswirkungen auf die Restlebensdauer von relevanten Komponenten zeigen soll. Beginnend mit dem ersten Prototypen im Pilotkraftwerk Rabenstein ist der Digitale Zwilling nun in der mittlerweile dritten Entwicklungsstufe im steirischen Kraftwerk Krippau an der Enns erfolgreich in Betrieb. Dort liefert er laufend seit April 2020 eine datenbasierte Restlebensdauer-Einschätzung des Kaplan-Laufrades. Das Digital Twin-Konzept soll weiter dazu beitragen, Revisionen zunehmend auf Basis der Datenlage durchzuführen. Unterstützung bekommt VERBUND hierbei von den Entwicklungspartnern ITficient und CADFEM. Im Beitrag wird auf das technische Konzept, die Umsetzung im Kraftwerk Krippau und das Potenzial bzw. Risiko der Technologie eingegangen.

**A**usgangspunkt für den Digitalen Zwilling sind hoch belastete Komponenten in schwer zugänglichen Bereichen der Turbine, wie im konkreten Entwicklungsprojekt der Verstellmechanismus und die Laufradschaufeln einer Kaplan-Turbine. An diesen Bauteilen können Ermüdungsbrüche und damit einhergehende lange Stillstände und Erzeugungsausfälle auftreten. Auch wenn derartige Ereignisse erfreulicherweise in der an sich robusten Wasserkraft bisher relativ selten sind, waren in der jüngeren Vergangenheit mehrere nennenswerte Schadensfälle zu beobachten. Beispielsweise kam es im

Donaukraftwerk Aschach zu einem Ermüdungsbruch an der Regelstange, welche die Stellbewegung des Servomotors zu den Laufradschaufeln überträgt. Eine hohe dynamische Belastung in Kombination mit einer ungünstigen Kerbstelle am Bohrungsgrund des Gewindes der Regelstange führten zum Bruch und einem anschließenden Maschinenstillstand von drei Monaten. Im Kraftwerk Rosegg an der Drau ist ein Schaufelverstellhebel gebrochen, mit einem anschließenden fünfmonatigen Maschinenstillstand und im Donaukraftwerk Greifenstein wurden im Zuge einer geplanten Revi-

sion Risse im Bereich der Laufradnabe festgestellt. Diese Beispiele zeigen, dass gerade im Kaplanlaufrad sensible Bereiche vorhanden sind und angesichts der möglichen Folgen jedenfalls Bedarf an einer bestmöglichen, datenbasierten Überwachung besteht.

Die Schadensfälle resultieren nicht zuletzt aus dem steigenden Anlagenalter, wirtschaftlich bedingten Streckungen der Revisions-Intervalle sowie auch gegenüber der ursprünglichen Auslegung geänderten Betriebsweisen, die mitunter deutlich höhere Belastungen der Maschinen ergeben. Bei Verbund werden

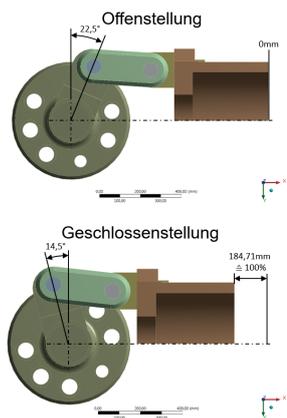
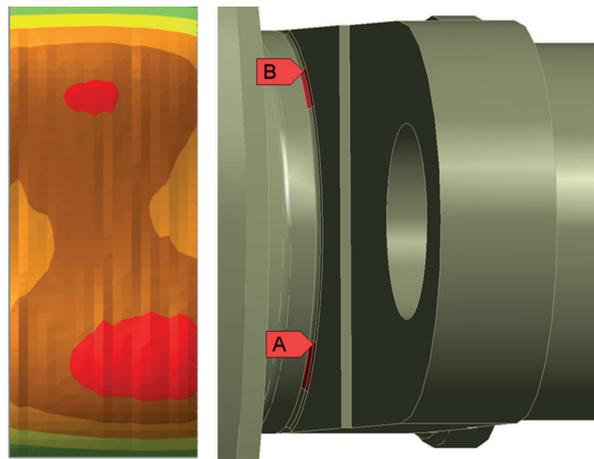


Abb. 1: Hotspot-Ermittlung am Beispiel Schaufel-Verstellhebel Rabenstein (Digitaler Zwilling 1.0)



2 Spannung-Hotspots: Maximalspannungen am kritischen Radius

heute die leistungsstarken Maschinen, insbesondere auch jene der Donaukraftwerke für die Primärregelung herangezogen, was zu einer deutlichen Erhöhung der Stellbewegungen und damit Maschinenbelastung führt. Die jüngsten Entwicklungen bzw. die bereits verfügbaren Werkzeuge im Bereich der Datenverarbeitung und Echtzeitsimulation bieten nun die Chance einer zuverlässigeren, datenbasierten Zustandsüberwachung. Darüber hinaus können mit Hilfe von Digitalen Zwillingen bei Veränderungen der Maschinenbetriebsweise die Folgen für den Instandhaltungsaufwand besser bewertet werden.

**TECHNISCHES KONZEPT DES DIGITALEN ZWILLINGS**

Um die Restlebensdauer eines Bauteils bestimmen zu können, werden die belastungsabhängigen Spannungen im Bauteil sowie deren zeitlicher Verlauf benötigt. Da die auftretenden Spannungen praktisch nicht messbar sind, müssen zunächst die hochbelasteten Bereiche (Hotspots) mittels FE-Analyse ermittelt werden. Konkret werden die Spannungen in den jeweiligen Komponenten für die unterschiedlichen Belastungssituationen in Abhängigkeit von der jeweiligen Schaufelstellung analysiert (vgl. Abb.1).

In den identifizierten Hotspots werden in weiterer Folge virtuelle Sensoren gesetzt. Diese liefern im laufenden Betrieb die Spannungswerte als Basis für die Berechnung der Restlebensdauer. Damit die Simulation parallel zum Maschinenbetrieb mitlaufen kann, ist eine intelligente Vereinfachung des komplexen FE-Modelles erforderlich. Kernstück des Digitalen Zwillings ist daher ein vereinfachtes Verhaltensmodell, das nur mehr die Bauteilspannungen in den Hotspots in Abhängigkeit von den Sensordaten aus dem Prozessleitsystem abbildet.

**DIGITALER ZWILLING IM KRAFTWERK KRIPPAAU**

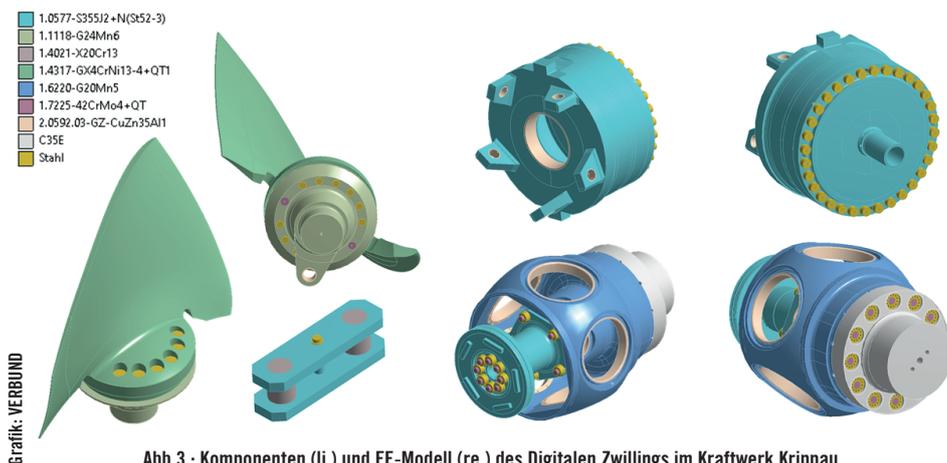
Ausgehend von den Erkenntnissen aus den ersten Prototypen mit Fokus auf den Schaufel-Verstellhebel im Kraftwerk Rabenstein wurde für das Kraftwerk Krippau ein umfassender Digitaler Zwilling für das komplette Kaplanlaufrad entwickelt. Das Kraftwerk Krippau wurde für die Weiterentwicklung des Zwillings in erster Linie aufgrund der Erneuerung des Kaplan-Laufrades und der Leittechnik ausgewählt. Damit konnten die Unsicherheiten bezüglich Geometrie und Vorschädigung der Maschine im Sinne einer bestmöglichen Restlebensdauerberechnung vermieden werden.

Konkret werden im Digitalen Zwilling Krippau alle im Betrieb hoch belasteten Komponenten der kinematischen Kette ausgehend vom Laufrad-Servomotor bis zum Laufradflügel laufend analysiert. Bei der Modellerstellung wurde insbesondere auf die realitätsgetreue Abbildung der hoch belasteten Kerbstellen geachtet.

Die Lebensdauernachweise nach FKM werden im Digitalen Zwilling Krippau für die Bauteile mit nicht trivialer Geometrie über die identifizierten Hotspots erbracht. Insgesamt werden 36 Hotspots in 8 Komponenten ausgewertet, wobei jeweils die erste Hauptspannung und von Mises-Vergleichsspannung berechnet werden. Für Bauteile mit bekannten Positionen der Spannungsmaxima (z.B. Bolzen, Gelenke, Laschen, Schweißnähte) werden Restlebensdauern durch 22 Nennspannungsnachweise nach FKM und weitere 15 Schraubennachweise nach VDI 2230 ermittelt. Insgesamt ergeben sich daraus für den Digitalen Zwilling Krippau 109 virtuelle Sensoren, wobei die entsprechende Betriebslast über acht Eingangsparameter (u.a. Fallhöhe, Laufradöffnung, Generatorleistung / -drehzahl, Hydraulikdrücke Laufradservomotor) definiert wird.

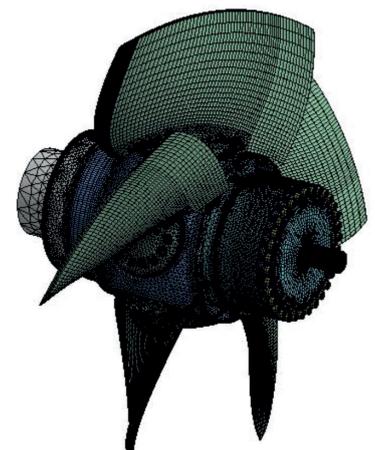
Die Überwachung der Eingangsgrößen und der zahlreichen Berechnungsergebnisse des Digitalen Zwillings erfordert jedenfalls auch eine durchdachte Visualisierung, die beispielhaft für eine Komponente (Laufschaufel) in Abb.4 gezeigt wird.

Im Dashboard (Abb. 4) ist ersichtlich, dass die nach einem Betriebsjahr errechneten Restlebensdauern für die Hotspots im Bereich der Laufschaufel am niedrigsten sind. Auffällig war, dass sich die Restlebensdauer in diesen Punkten in den ersten 10 Betriebsmonaten kontinuierlich verringert und dann bei den aktuellen Werten eingependelt hat (vgl. Abb. 5). Die bisherigen Ergebnisse erscheinen jedenfalls plausibel bzw. entsprechen den Erwartungen.



Grafik: VERBUND

Abb.3.: Komponenten (li.) und FE-Modell (re.) des Digitalen Zwillings im Kraftwerk Krippau



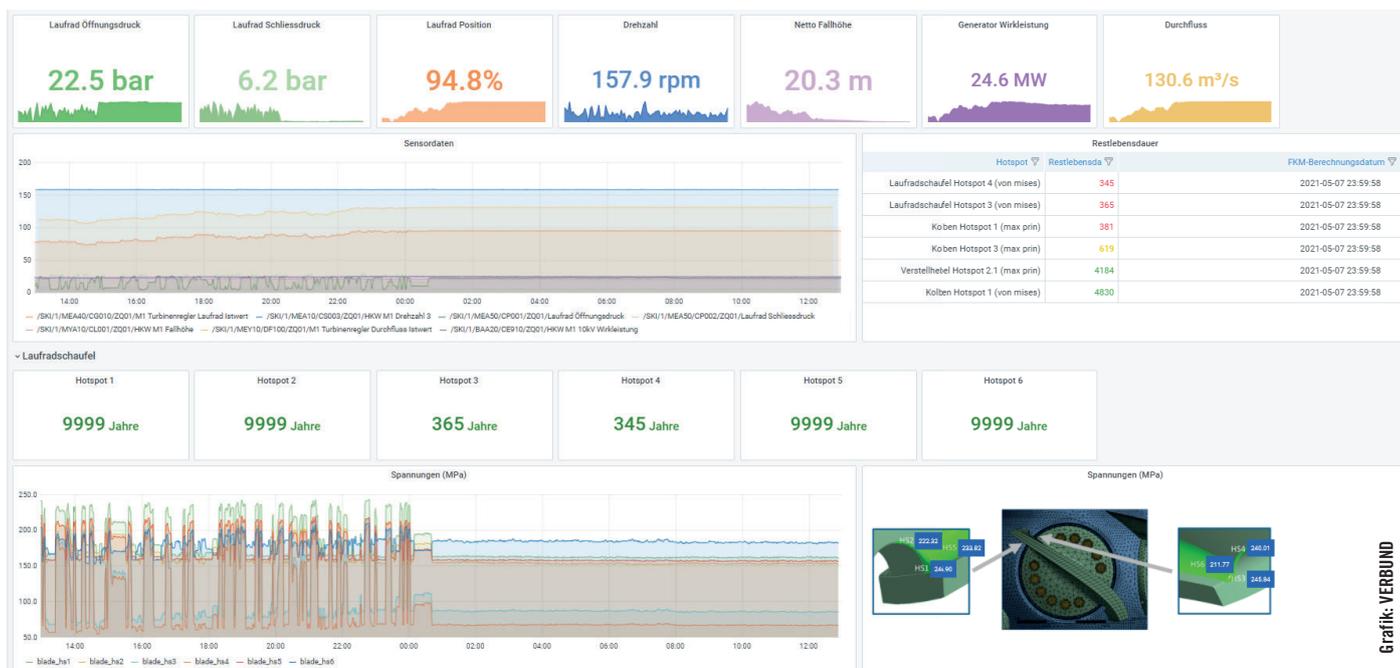


Abb.4.: Auszug Grafana-Dashboard des Digitalen Zwillings Krippau (Beispielkomponente Laufschaufel)

### INTEGRATION DES DIGITALEN ZWILLINGS IN DIE VERBUND-IT

Während die ersten Prototypen im Sinne einer schnellen Konzept-Erprobung noch auf der Amazon Web Services Cloud-Plattform umgesetzt wurden, war für den Digitalen Zwillings Krippau aus unterschiedlichen Gründen eine vollständige Umsetzung auf der IT-Infrastruktur von VERBUND gefordert. Eine wesentliche, infrastrukturelle Voraussetzung sind hierbei entsprechend leistungsfähige Systeme zur Daten-Zwischenspeicherung sowie zur systematischen Abarbeitung der kontinuierlichen Berechnungen. Beispielsweise kann sich die Datenmenge kurzfristig enorm steigern (z.B. bei schnellen Laständerungen) und oft sind gerade diese Ereignisse entscheidend für die Qualität der Ergebnisse. Der gesicherten und systematischen Abarbeitung der Berechnungen im Digitalen Zwillings kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Konkret wird bei VERBUND Kafka zur Datenpufferung eingesetzt und OpenShift als Plattform für den Betrieb der Komponenten des Digitalen Zwillings. Diese Systeme bieten den Vorteil einer einfachen Wartung und Skalierbarkeit.

### ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Nach mehreren Entwicklungsstufen hat sich im Rahmen des Innovations- und Digitalisierungsprogrammes „Digitales Wasserkraftwerk“ von VERBUND gezeigt, dass die ursprünglichen Erwartungen in den Digitalen Zwillings aus technischer Sicht vollständig erfüllt werden können. Die laufende Restlebensdaueranalyse von relevanten Maschinenkomponenten ist auf Basis der Betriebsdaten möglich und liefert plausible Ergebnisse. Zudem können die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsweisen auf die Restlebensdauer simuliert werden. Der Digitale Zwillings stellt somit eine wertvolle Unterstützung für die zunehmend datenbasierte Festlegung von Revisionsintervallen und auch von Maschinenbetriebsweisen dar.

Aus ökonomischer Sicht ist die Umsetzung von derartigen Zwillings insbesondere bei Kraftwerken mit einer größeren Anzahl an vergleichbaren Maschinen aufgrund der Synergien bei der Erstellung interessant. Im nächsten Schritt wird das Konzept daher auf das Donaukraftwerk Ottensheim-Wilhering übertragen. In diesem Kraftwerk werden bis 2029

insgesamt neun Turbinenlaufräder erneuert, die mit Digitalen Zwillings überwacht werden sollen. Optimiert werden müssen noch die Betriebskosten für den Digitalen Zwillings, die sich aus Lizenz- und IT-Kosten zusammensetzen. Angesichts der rasanten technologischen Entwicklungen bzw. weiteren erwarteten Preisreduktionen, erscheint jedoch die wirtschaftliche Darstellbarkeit in naher Zukunft möglich.

Für Interessierte bietet sich am 15. September 2021 bei der VGB/VERBUND Online-Veranstaltung „Digitalization in Hydropower“ eine Diskussionsmöglichkeiten zum Thema mit den Experten von VERBUND, ITficient und CADFEM. Darüber hinaus wird in diesem Rahmen eine Vorführung des Digitalen Zwillings im Kraftwerk Krippau stattfinden. **(Programm & Anmeldung unter: [https://www.vgb.org/digi\\_hpp\\_2021.html](https://www.vgb.org/digi_hpp_2021.html))**

**Kontakt**  
 Michael Artmann  
 VERBUND Hydro Power GmbH  
 Michael.Artmann@verbund.com



Abb.5.: Restlebensdauer-Entwicklung in 4 Hotspots im Bereich der Laufschaufel (Anzeige der Restlebensdauer wurde auf max. 9999 Jahre beschränkt)