Das Luftgeformte Wasserrad

Ein interdisziplinäres Forschungsprojekt im Rahmen der
III. Wasser Biennale in Fürstenfeld

PROJEKTBERICHT

Clemens Lehner, BSc

Wien, April 2013

Kurzfassung

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt wurde aus der Synthese von Kunst und Technik ein höchst experimentelles Konzept für ein luftgeformtes Wasserrad entwickelt und in der Praxis erprobt. Luftgeformt bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Großteil der Bestandteile aus Pneus besteht. Durch diese als Auftriebskörper wirkenden Pneus schwimmt das Wasserrad samt allen integrierten Komponenten wie Getriebe und Generator im Wasser. So wird es an seinen Achsenden nur über zwei Seile an seiner Position im Fluss gehalten. Ein an diesen Seilen geführtes Kabel versorgt die Verbraucher an Land mit elektrischer Energie.

Das Wasserrad wurde im Rahmen der Wasser Biennale in Fürstenfeld in der Feistritz installiert. Im Betrieb zeigten sich Schwierigkeiten, die mit Materialermüdung infolge der permanenten Beanspruchung einer einseitig belasteten rotierenden Maschine zusammenhängen. Die meisten Herausforderungen konnten durch Optimierung gemeistert werden, die Entwicklung zu einem für den Dauereinsatz geeigneten schwimmenden Kleinkraftwerk konnte in diesem Projekt aber nicht abgeschlossen werden.

Über den Ansatz der experimentellen Forschung und Entwicklung wurden mit zwei verschiedenen Prototypen im Praxistest unzählige Daten gesammelt und wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die eine wichtige Basis für zukünftige Entwicklungen im Bereich minimalinvasiver Kleinwasserkraft, aber auch ganz allgemein für den Einsatz tragender pneumatischer Strukturen in bewegten Bauteilen bilden können.

Schlagwörter: Luftgeformt, Wasserrad, Kunst, Technik, Interdisziplinär, Elektrizität

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 5
1.1 Vorangegangene Entwicklungen ... 6
1.2 Zielsetzung ... 8
1.3 Team ... 9
1.4 Finanzierung ... 9
1.5 Vergleichbare Technologien ... 10

2 Entwurf, Auslegung und Planung ... 12
2.1 Hydrodynamik, Berechnungen ... 12
2.2 Konzeptionierung ... 16
2.2.1 Standort und Anbringung im Fluss ... 16
2.2.2 Das Wasserrad ... 18
2.3 Die Komponenten des Wasserrades ... 21
2.3.1 Generatorboxen und Getriebe ... 21
2.3.2 Mittelkörper ... 23
2.3.3 Schwimmkörper und Seitenaufbauten ... 25
2.3.4 Beschaufelung ... 26
2.4 Schaltkasten – Inselsystem ... 28

3 Umsetzung und Entwicklungsverlauf ... 29
3.1 Modell 1: rein pneumatische Seitenaufbauten ... 30
3.2 Modell 2: Rigid verstärkte Seitenaufbauten ... 30
3.3 Modell 3: Verbesserte Seitenaufbauten und modifiziertes Getriebe ... 33
3.4 Technische Daten ... 39

4 Ergebnisse ... 39
4.1 Probleme und Lösungen ... 40
4.2 Erkenntnisse ... 41

5 Zusammenfassung und Ausblick ... 44

Literatur- und Quellenverzeichnis ... 45

Abbildungsverzeichnis ... 46

1 Einleitung

Die Wasser Biennale ist eine regelmäßige Kunstveranstaltung, die den öffentlichen Raum in und um Fürstenfeld mit Werken, Installationen und Aktionen rund ums Wasser bespielt. Ihr Anspruch ist, dass Kunst dabei nicht sich selbst genügt, sondern fruchtbare Impulse in alle Sphären des Lebens ausstrahlt. Kunst tritt in Dialog mit Wissenschaft, Technik, Architektur, Wirtschaft und Sozialem.

Schon sehr früh erhielt die Künstlerin Isabella Pessl Einblick in die alte, heute fast vergessene Tradition des Wasserradbaus. Ihr Vater baute und restaurierte in seiner Zimmermannstätigkeit unzählige hölzerne Wasserräder, überwiegend in der Steiermark.
Auf Anregung von Univ.Prof.^{in} Barbara Putz-Plecko und betreut von Univ.Lektor P. Michael Schultes transformierte Isabella Pessl bereits im Jahr 2009 ihre Eindrücke und Erfahrungen in einen ersten „historisierenden“ Prototyp in luftgeformter Struktur, der im Studio von experimonde | die Welt des Experiments hergestellt und im Wienfluss einem Praxistest unterzogen wurde. Eine eingehende Darstellung dieser Arbeiten findet sich im folgenden Kapitel 1.1.

Im vorliegenden Projekt wurde untersucht, ob und wie sich die seit Jahrtausenden von Menschen genutzte Technologie des Wasserradbaus in transformierter Form als moderne, ökologische Alternative zur Energiegewinnung eignet. Die Wasser Biennale bot den geeigneten Rahmen, das höchst experimentelle Konzept eines luftgeformten Wasserrads in der Praxis zu erproben. Aus der Synthese von Kunst und Technik wurde ein Wasserrad entwickelt, das ohne spürbare Eingriffe in die Natur Elektrizität erzeugt, und damit eine der wichtigsten Ressourcen unserer Zeit auf ökologisch verträglichem Weg bereitstellt.
Der künstlerische Impuls von Isabella Pessl wurde dabei von den Technikern Clemens Lehner und Fabian Massiczek aufgegriffen und in ein leistungsfähiges Kleinkraftwerk verwandelt.

experimonde | die Welt des Experiments unter der Leitung von P. Michael Schultes wirkte als Katalysator, der die Projektmitglieder, Ideen und verschiedenen Fachrichtungen zusammenbrachte.
Schon seit langem ist experimonde erfolgreich als Netzwerk und Kompetenzzentrum im Bereich luftgeformter Strukturen, hauptsächlich auf Architektur bezogen, tätig. Sein Schwerpunkt liegt dabei auf der experimentellen Forschung. experimonde negiert nicht den Wert und die Relevanz von Grundlagenforschung und Spezialwissen, erkennt dabei aber, dass der konventionelle Lehr- und Forschungsbetrieb in einem permanenten Prozess durch das Aufbrechen festgefahrener Strukturen und abgegrenzter Fachrichtungen essentiell wichtige Erneuerung erfahren muss. Nur aus diesem interdisziplinären Ansatz kann radikal Neues entstehen. Das luftgeformte Wasserrad ist eine solche disruptive Innovation, die

einen neuen Blick auf unser Energieerzeugungssystem sowie das Zusammenspiel von menschlicher Kultur und Natur ermöglicht.

1.1 Vorangegangene Entwicklungen

Im Zuge der Auseinandersetzung der Künstlerin Mag.[a] Isabella Pessl mit der historischen Technologie des Wasserradbaus aus künstlerischer Sicht entstand die Idee, ein Kunstwerk in Form eines aufblasbaren Wasserrades zu schaffen.
Auf Anregung von Frau Univ.Prof.[in] Barbara Putz-Plecko, Vizerektorin und Leiterin der Abteilung Textiles Gestalten an der Universität für angewandte Kunst Wien, entstand bereits 2009 ein Kooperationsprojekt der Künstlerin mit Univ.Lektor P. Michael Schultes und dem von ihm gegründeten Forschungsnetzwerk experimonde | die Welt des Experiments.
Zunächst wurden die Eindrücke und Erfahrungen der Künstlerin in ein erstes „historisierendes“ Modell aus PMMA (Acrylglas) als Vorlage für die luftgeformte Struktur umgesetzt (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Modell aus PMMA (Isabella Pessl)

Nach diesem Modell fertigte P.M.Schultes ein maßstabgleiches Modell an, welches in Abbildung 2 zu sehen ist. Dieses Modell erhielt seine Form durch vier aneinander liegende Reifen aus PVC-Folie, die mit einer Hülle aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe überzogen waren. Das Modell verfügte über eine durchgehende Achse, die durch zwei an der Hülle befestigte Kugellager führte. In diesem Stadium entstand die Idee, die künstlerische Intention in ein Ingenieursprojekt einmünden zu lassen. Im entstandenen Hohlraum sollten alle Komponenten für eine Nutzung der Rotationsenergie untergebracht und die gewonnene elektrische Energie nur noch über an den Halteseilen geführte Kabel „an Land gebracht“ werden. Im konkreten Fall des Prototyps wurde die gewonnene Energie allerdings der Einfachheit halber direkt am Objekt in Licht umgewandelt.

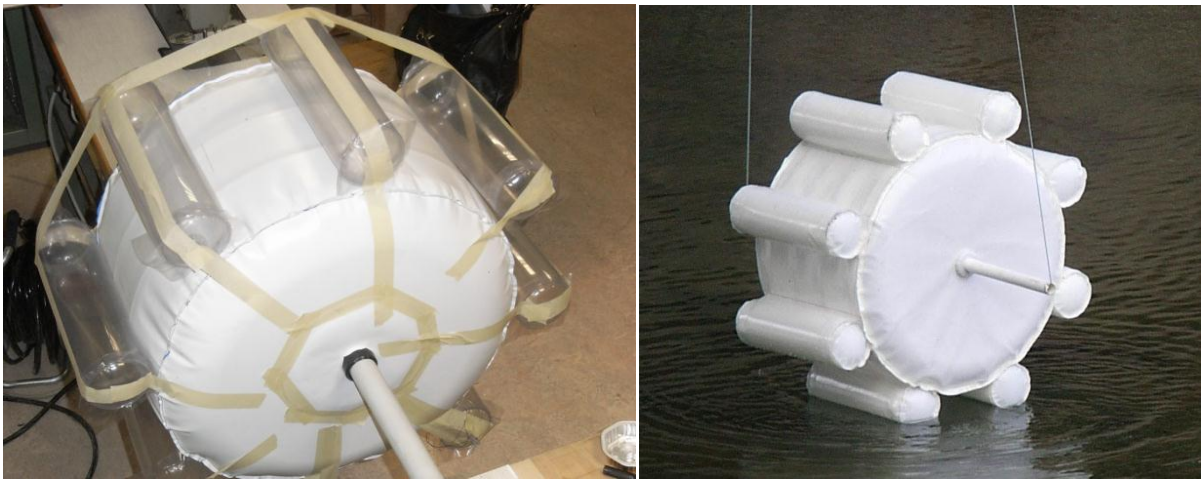


Abbildung 2: Modell aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe (P.Michael Schultes)

Die Weiterführung der Arbeit erfolgte mehr als ein Jahr nach dieser Modellherstellung, dazwischen lag ein erfolgreicher Funktionsversuch im Neulengbach.

Der mannsgroße Prototyp wurde nach den gleichen Konstruktionsprinzipien hergestellt (siehe Abbildung 3). Um die Wirksamkeit des Rades als Stromquelle zu demonstrieren, wurde von Andreas Urlieb eine Lichtmaschine mit einem Getriebe eingebaut, das an den Seitenwänden befindliche LEDs zum Leuchten brachte.

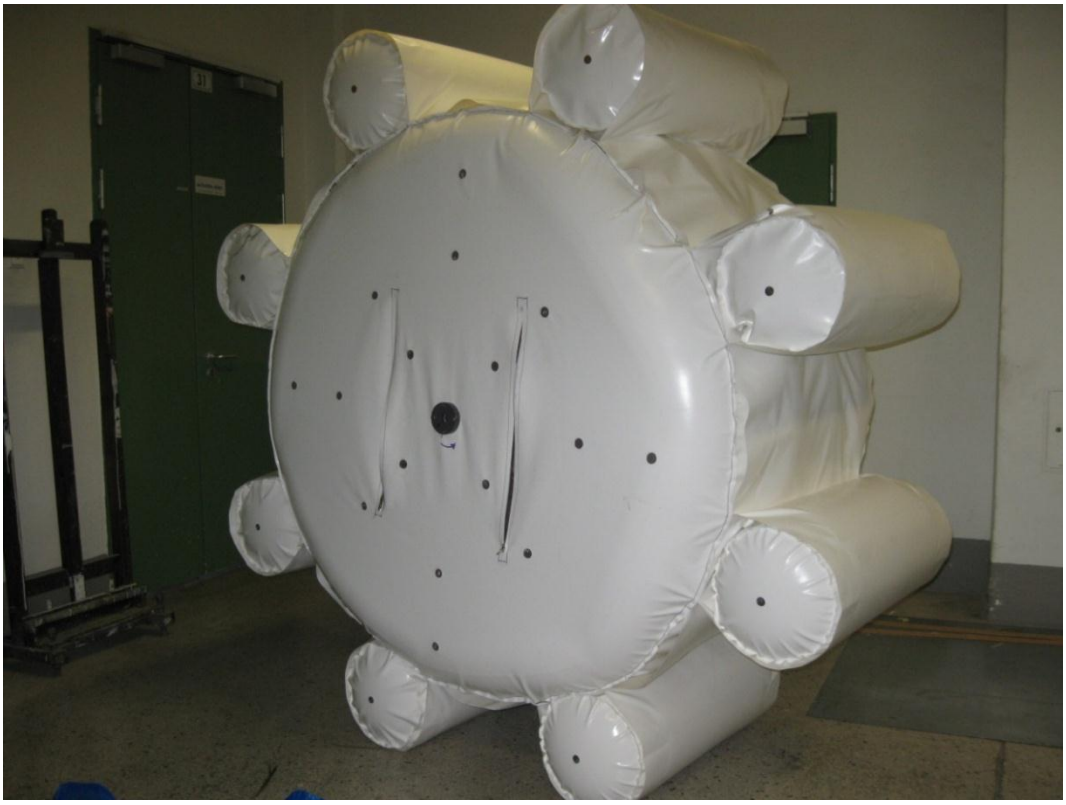


Abbildung 3: Mannsgroßer Prototyp

Mit Bewilligung der städtischen Wienflussaufsicht wurde dieses Rad am 18. Juni 2009 bei der Wackenroderbrücke im Wienfluss einem Praxistest unterzogen. Trotz extrem niedrigem Wasserstand wurden die LEDs zum Leuchten gebracht.
Allerdings zeigte sich, dass die von historischen Vorbildern abgeleitete schlanke Geometrie keine für die vorgesehene Seilhalterung ausreichende Stabilität gewährleistete und eine mehr „lagerhafte“ Geometrie Voraussetzung für weitere Versuche sein müsste. Das Projekt schien letztlich mangels finanzieller und personeller Ressourcen abgeschlossen.

Im Jahr 2012 ersuchte P.M.Schultes den Autor des folgenden Berichtes als Experten von experimonde im Bereich erneuerbarer Energie um eine Abwägung der Sinnhaftigkeit weiterer Experimente und stellte dafür den Kontakt zur Künstlerin und zu seinem Freund Günther Pedrotti her, um von Beginn an ein geeignetes Experimentierfeld zu schaffen.
Das Ergebnis dieser grundlegenden Arbeit liegt im Folgenden als ausführliche Studie vor, beginnend bei den historischen Wurzeln der Nutzung der Wasserkraft.

1.2 Zielsetzung

Ziel des vorliegenden Projekts war die Weiterentwicklung der vorangegangenen Arbeiten durch Entwurf, Bau und praktische Erprobung eines leistungsfähigen luftgeformten Wasserrads. Die drei wichtigsten, zu Projektstart definierten Ziele sind:

1. Entwurf und Bau des Wasserrads weitestgehend aus luftgeformten, also aufblasbaren Komponenten,
2. Erzeugung elektrischer Energie zum Betrieb einer Straßenlampe und einer Ladestation für Elektrofahrräder,
3. Betrieb des Wasserrads im Rahmen der Wasser Biennale über knapp vier Monate, von Juli bis Oktober 2012.

Luftgeformte Bauteile haben den Vorteil, dass sie unter äußerst geringem Materialverbrauch sehr große Strukturen bilden können. Damit eignen sie sich besonders für temporäre Installationen, haben aber auch schon in Langzeitanwendungen in der Architektur bis hin zum Brückenbau Einzug gehalten. In diesem Projekt wurde ihre Eignung für rotierende Maschinen erprobt.
Als Demonstrationsobjekt sollte das Wasserrad nicht nur als Kunstwerk überzeugen, sondern seine energietechnische Relevanz durch die Erzeugung von elektrischem Strom unter Beweis stellen.

1.3 Team

Die Organisationsstruktur des Projekts ist aus Abbildung 4 ersichtlich. Darin sind die wichtigsten Projektbeteiligten mit ihrer Funktion und ihren Aufgaben angeführt. Dazu kommen zahllose freiwillige Helfer, ohne deren tatkräftige Mithilfe die Durchführung des Projekts in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

	Organisation	Funktion im Projekt	Tätigkeiten
Mag.[a] Isabella Pessl	Universität für Angewandte Kunst Wien, freischaffende Künstlerin	Ideengebung	Entwicklung der Grundidee, Mithilfe bei Montagearbeiten
DI P.Michael Schultes	experimonde, Universität für Angewandte Kunst Wien, TU Wien	Initiator des Projekts, Netzwerker, Ausführungsarbeiten	Organisation von Werkstätten, Anfertigung der luftgeformten Teile
Günther Pedrotti	Verein Wasserkunstwerke Salesgraben (Obmann)	Künstlerischer Leiter der Wasser Biennale	Organisation der rechtlichen und finanziellen Rahmenbedingungen
Clemens Lehner, BSc	Project Sunsausage, experimonde	Technische Projektleitung, Ausführungsarbeiten	Berechnungen, Entwurf und Planung, Bau und Weiterentwicklung, Erstellung des Berichts
Fabian Massiczek, BSc	Project Sunsausage, FH Technikum Wien	Planung, Ausführungsarbeiten	Mitwirkung an Entwurf und Planung, Durchführung von Bau und Weiterentwicklung
Simon Laburda	DKIA (digitale konzeptionelle IT alchemie)	Planung, Ausführungsarbeiten	Planung und Bau der elektrischen Komponenten (Schaltkasten)

Abbildung 4: Projektteam

1.4 Finanzierung

Ein großer Teil der Kosten für das Projekt „Luftgeformtes Wasserrad“ wurde vom Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur (Abtlg. Interdisziplinäre Kunst) getragen, das die Wasser Biennale mit finanziellen Mitteln ausstattete. Die restlichen Kosten wurden aus privaten Mitteln der Projektmitglieder Clemens Lehner, Fabian Massiczek und Isabella Pessl finanziert.

Alle Arbeiten wurden in ehrenamtlicher Tätigkeit der Projektmitglieder durchgeführt.

Großer Dank gebührt an dieser Stelle den Familien Massiczek und Schalk, die die erforderlichen Werkstätten zur Durchführung der Arbeiten in Wien und Fürstenfeld unentgeltlich zur Verfügung stellten. Dazu kommen mehrere Arbeitsstätten von universitären Bildungseinrichtungen in Wien, die ebenfalls kostenlos benutzt werden konnten (siehe auch Kapitel 3).

1.5 Vergleichbare Technologien

Seit tausenden von Jahren benutzt der Mensch Wasserräder, um Muskelkraft durch gezielt gelenkte Energieströme aus der Natur zu ersetzen. Genutzt werden sie zur landwirtschaftlichen Bewässerung (Schöpfräder), zum direkten Betrieb mechanischer Arbeitsmaschinen (Sägewerke, Hammerwerke, etc.) und natürlich zum Mahlen von Getreide (Wassermühlen).
Im Lauf der Zeit wurden verschiedenste Bauformen entwickeln. Die wichtigsten davon kann man in oberschlächtige, mittelschlächtige und unterschlächtige Wasserräder einteilen. Die Zuordnung erfolgt dabei nach der Höhe, in der das Wasser über Triebwasserkanäle dem Wasserrad zugeführt wird. Wasserräder, die keine Stauwehre und Triebwasserkanäle verwenden, sondern mit ihren Schaufeln direkt in ein frei strömendes Gewässer eintauchen, werden Flussräder oder auch tiefschlächtige Wasserräder genannt. Zu ihnen gehören beispielsweise die Schöpfräder. Eine besondere Bauform ist die sog. Schiffsmühle, ein Flussrad, das auf einem fest vertäuten Schiff angebracht ist.
Erstmals bezeugt sind solche Schiffsmühlen bereits für das Jahr 540 n.Chr., als diese Mühlen während der Belagerung von Rom durch die Ostgoten die einzige Möglichkeit darstellten, die lebenswichtige Versorgung der Stadt mit Mehl sicherzustellen [GREG59].

Heute sind Wasserräder beinahe vollständig aus unserem Umfeld verschwunden und finden fast nur noch in Entwicklungsländern Anwendung. Sie wurden durch Turbinen ersetzt, die ihnen im Wirkungsgrad meist überlegen sind und weitere Vorteile wie eine kleine Bauform und hohe Drehzahl besitzen, was es leichter macht, sie zum Betrieb eines elektrischen Generators einzusetzen.
Dennoch gibt es gerade in jüngster Zeit wieder vermehrt Initiativen und Pilotprojekte, die zu einer Renaissance des Wasserrads beitragen könnten. Der Grund dafür ist, dass Wasserräder, nach dem Prinzip einer Schiffsmühle schwimmend im Fluss angebracht, elektrische Energie erzeugen können, ohne störend in den Flusslauf eingreifen zu müssen. Stromerzeugende Schiffsmühlen sind somit eine außerordentlich ökologische Form der Wasserkraftnutzung. Konzepte nach diesem Prinzip werden auch als „Energieinseln“ oder „Strombojen“ bezeichnet. Stellvertretend für eine ganze Reihe interessanter neuerer Entwicklungen sind zwei Beispiele in Abbildung 5 und Abbildung 6 zu sehen.

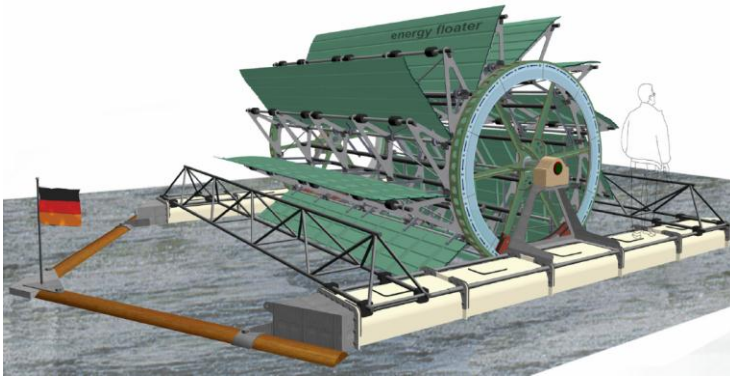


Abbildung 5: Elb-Strom 1 [ELBS10]

Abbildung 6: Energy-Floater [SPIE11]

Elb-Strom 1 ist eine Pilotanlage, die im Jahr 2010 getestet wurde. Daten und Ergebnisse aus dem Betrieb sind uns leider nicht bekannt. Beim Energy-Floater handelt es sich um eine schwimmende Wasserkraftanlage mit einer angestrebten Leistung von 5 - 35 kW je Einheit. Dieses Konzept ist sehr interessant, da die Schaufelblätter klappbar sind und so während der Drehung im Wasser an den jeweils optimalen Schaufelwinkel angepasst werden können. Um die für Wasserräder typische geringe Drehzahl ohne Getriebe direkt in elektrischen Strom umwandeln zu können, ist es mit einem hochpoligen Ringgenerator ausgestattet.
Einen Überblick über diverse Forschungsprojekte kann man beim NEMO-Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom gewinnen [NTFS13].

Wie die alten Schiffsmühlen besitzen die oben angeführten Konzepte separate Schwimmkörper, auf denen das Wasserrad mit seinem gesamten Gewicht ruht und drehbar gelagert ist. Das einzige uns bekannte Wasserrad, das selbst auf der Wasseroberfläche

Abbildung 7: HEB generator

schwimmt und somit keine externen Schwimmkörper benötigt, ist der in Abbildung 7 gezeigte HEB Generator (Hydro-Electric-Barrel) des britischen Erfinders Mike Lowery. Doch auch bei diesem Modell ist der elektrische Generator selbst extern angebracht, was das Stahlgerüst rundherum erforderlich macht.

2 Entwurf, Auslegung und Planung

Das zu entwickelnde Wasserrad sollte ohne Eingriffe in den natürlichen Verlauf des Flusses auskommen. Nach dem im vorangehenden Kapitel ermittelten Stand der Technik ist es das erste Mal, dass der radikale Schritt gewagt wurde, alle Komponenten einer modernen Schiffsmühle direkt in das Wasserrad zu integrieren. Wasserrad, Schwimmkörper und Generator bilden eine abgeschlossene, frei in der Strömung schwimmende Einheit. Lediglich über zwei am Ufer verankerte Seile wird es an den Achsenden an seiner Position im Fluss gehalten.
Gleichzeitig sollten mit Textilien und Pneus Materialien und Konstruktionsweisen zum Einsatz kommen, die im Wasserradbau bisher noch nie angewendet wurden.

Im Verlauf des Projektes durchlief das Wasserrad zahlreiche Modifizierungen als Reaktion auf sich zeigende Probleme und neugewonnene Erkenntnisse. Dieses Kapitel zeigt hauptsächlich die Grundversion, Weiterentwicklungen werden in Kapitel 3 geschildert.

2.1 Hydrodynamik, Berechnungen

Im Gegensatz zu den etablierten Technologien im Bereich der Wasserkraft benötigt ein Flussrad keine Eingriffe in den Flusslauf. Die heute üblichen Staumauern schaffen eine Höhendifferenz im Flusslauf, eine sog. Fallhöhenkonzentration, wobei moderne Turbinen ebenso wie alte Wasserräder vornehmlich potentielle Energie, auch Lage- oder Höhenenergie genannt, in elektrische Energie umwandeln. Das Flussrad dagegen nutzt allein die Strömungsenergie bzw. kinetische Energie des Wassers. Es nutzt gewissermaßen die Energie, die aus dem Abbremsen des Wassers gewonnen werden kann. Freilich kann es nicht die gesamte kinetische Energie umwandeln, da dies bedeuten würde, das Wasser bis zum vollständigen Stillstand abzubremsen. Das Wasser muss nach dem Wasserrad noch eine gewisse Geschwindigkeit besitzen, um abfließen zu können. Aus diesem Grund besitzen Strömungsmaschinen wie ein Flussrad, das in diesem Punkt große Ähnlichkeiten mit einer Windturbine besitzt, bauartbedingt deutlich geringere Wirkungsgrade als herkömmliche Wasserräder und Turbinen, die eine Höhendifferenz nutzen können.

Die folgende Formel ist aus der Energiegleichung für Strömungen hergeleitet (Bernoulli) und zeigt die Leistung P, die eine Strömung mit der Dichte ρ in Form von kinetischer Energie beinhaltet:

$$P = v^3 \frac{A * \rho}{2}$$

Der Strömungsquerschnitt A geht linear in die Leistung ein. Von größter Wichtigkeit für die Leistung ist hier die Geschwindigkeit v des Wassers, da sie mit der dritten Potenz in die Leistung eingeht. Das bedeutet also, dass eine Verdoppelung der Geschwindigkeit einer Verachtfachung der zur Verfügung stehenden Leistung entspricht.

Bei der Auswahl des Standortes für das Wasserrad wurde demnach besonderes Augenmerk auf die Strömungsgeschwindigkeit gelegt. An der gewählten Stelle unterhalb des Wehres der Familie Schalk in Fürstenfeld wurde am 14.04.2012 die Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche mit Schwimmkörpern gemessen. Es ergab sich über die relevante Breite eine mittlere Geschwindigkeit von rund 1m/s, welche nun als Auslegungsgeschwindigkeit gewählt wurde, zumal die Abflusswerte der Messstationen in Anger und Maierhofen den Wasserstand dieses Tages als typisch auswiesen.

Bei den folgenden Berechnungen war es kaum möglich, sich auf bestehende Literatur zu stützen. Zum einen fristen Wasserräder seit gut einem Jahrhundert ein Schattendasein in unserer Energieerzeugung, zum anderen beziehen sich die wenigen erhältlichen Berechnungsmöglichkeiten auf ober- oder unterschlächtige Wasserräder, die Stauwehre und geschlossene Triebwasserkanäle besitzen. [NUER05] bot einige Anhaltspunkte zur Berechnung des optimalen Anstellwinkels der Schaufeln beim Ein- und Austritt aus dem Wasser, allerdings bezieht sich auch diese Quelle auf mittel- und unterschlächtige Wasserräder mit Triebwasserkanälen. Literatur zur Berechnung und Auslegung von Flussrädern ist uns leider nicht bekannt.
Dennoch wurden aus den in [NUER05] angegebenen Berechnungsmethoden zwei einfache Modelle zur Auslegung eines Flussrades entwickelt, ein „Stromschlauchmodell“ und ein „Ausweichmodell“. Sie wurden zur Auslegung des vorliegenden Wasserrades herangezogen. Über mehrere Iterationsschritte wurden daraus die wichtigsten Abmessungen des Wasserrades sowie die Tauchung H_T gewonnen, welche die maximale Höhe angibt, mit der die Schaufelblätter in die Strömung eintauchen.

Der Schaufelwinkel β_S beschreibt den Winkel des Schaufelblatts zur Tangente am Außenumfang eines Wasserrades. Ein Schaufelwinkel β_S=90° bedeutet also eine genau radiale Anbringung der Schaufelblätter. Es lässt sich ein Optimum sowohl für den Eintritt des Wassers in das Rad (β_2) als auch für den Austritt des Wassers aus dem Schaufelraum (β_3) errechnen. Beide Winkel sind von mehreren Parametern abhängig wie der Schnellläufigkeit ϴ, dem Durchmesser des Wasserrades und der Tauchung H_T.

Der optimale Eintrittswinkel β_2 gewährleistet eine verlustfreie Überleitung des Impulses der Strömung auf die Drehbewegung des Wasserrads. Das verhindert Stoßverluste auf zu steil gestellte Schaufelblätter einerseits und verlustbehaftetes „Aufklatschen“ sehr flacher Schaufeln auf die Wasseroberfläche beim Eintauchen andererseits.
Der richtige Austrittswinkel β_3 gewährleistet ein verlustfreies Abfließen des Wassers hinter dem Wasserrad.
Sind die Schaufeln fest mit dem übrigen Wasserrad verbunden, muss der optimale Schaufelwinkel am Eintritt mit dem optimalen Schaufelwinkel am Austritt zur Deckung gebracht werden. Bei modernen Wasserrädern um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert wird dies erreicht, indem der Eintrittswinkel des Wassers vom Triebwasserkanal über sogenannte Kulissen auf praktisch beliebige Werte eingestellt werden kann.
Bei einem frei im Wasser schwimmenden Rad, einem Flussrad, existiert diese Möglichkeit nicht, da die Strömung nicht durch bauliche Maßnahmen beeinflusst wird und vor wie nach dem Rad unter Vernachlässigung des Gefälles praktisch horizontal verläuft. Die einzige Möglichkeit, den Winkel zwischen Strömungsrichtung und Tangente am Eintrittspunkt zu verändern, bieten die Parameter Raddurchmesser und Tauchung H_T. Eine optimale Anpassung des Schaufelwinkels an Ein- wie Austritt führt unweigerlich zu einer sehr geringen Tauchung oder einem sehr großen Raddurchmesser. Das bedeutet, die Schaufeln und damit die aktiven Teile des Wasserrades werden sehr klein im Vergleich zu dem gesamten Rad. Materialaufwand und Leistungsdichte stehen in einem sehr ungünstigen Verhältnis.
Der in Kapitel 1.5 beschriebene Energy-Floater umgeht dieses Problem, indem die Schaufelblätter beweglich gelagert sind und somit während der Umdrehung den Schaufelwinkel β_S verändern können. Für das vorliegende Projekt wurde eine derartige Lösung aufgrund des großen technischen Aufwands nicht in Betracht gezogen. Stattdessen wurde ein Kompromiss zwischen Leistungsdichte bzw. Materialaufwand und akzeptablen Strömungsverlusten eingegangen.
Auf Basis der topographischen Voraussetzungen und der hydrodynamischen Berechnungen wurde der Raddurchmesser mit 150cm, die Tauchung H_T mit 35cm und der Schaufelwinkel β_S mit 75° gewählt.

Im Weiteren wurde das Wasserrad nun unter starken Vereinfachungen als reiner Widerstandsläufer betrachtet. Für das Drehmoment steht also der von der Drehzahl abhängige Staudruck an der Querschnittsfläche zur Verfügung, mit der die Schaufeln ins Wasser eintauchen. Leider bleiben bei dieser Berechnung zahlreiche Sachverhalte unberücksichtigt, wie etwa die unterschiedliche Geschwindigkeit der Schaufelblätter in Abhängigkeit von der Entfernung zur Drehachse, die gerade bei Wasserrädern mit großer Tauchung bei kleinem Gesamtdurchmesser sehr stark variiert. Die Entwicklung einer passenderen Theorie zur Berechnung von Flussrädern wäre also wünschenswert!

Wie auch immer, die folgende Abbildung 8 zeigt die berechnete Leistung, die als Produkt von Drehmoment mal Winkelgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Drehzahlen an der Antriebswelle des Generators bzw. Getriebes zur Verfügung steht. Die Berechnungen beziehen sich auf eine Schaufelbreite von 2m bei einer Eintauchtiefe von 35cm. Die mechanische Leistung ist über der Schnellläufigkeit ϴ dargestellt. Diese beschreibt das Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit im Schaufelschwerpunkt zur unbeeinflussten Fließgeschwindigkeit vor dem Wasserrad.

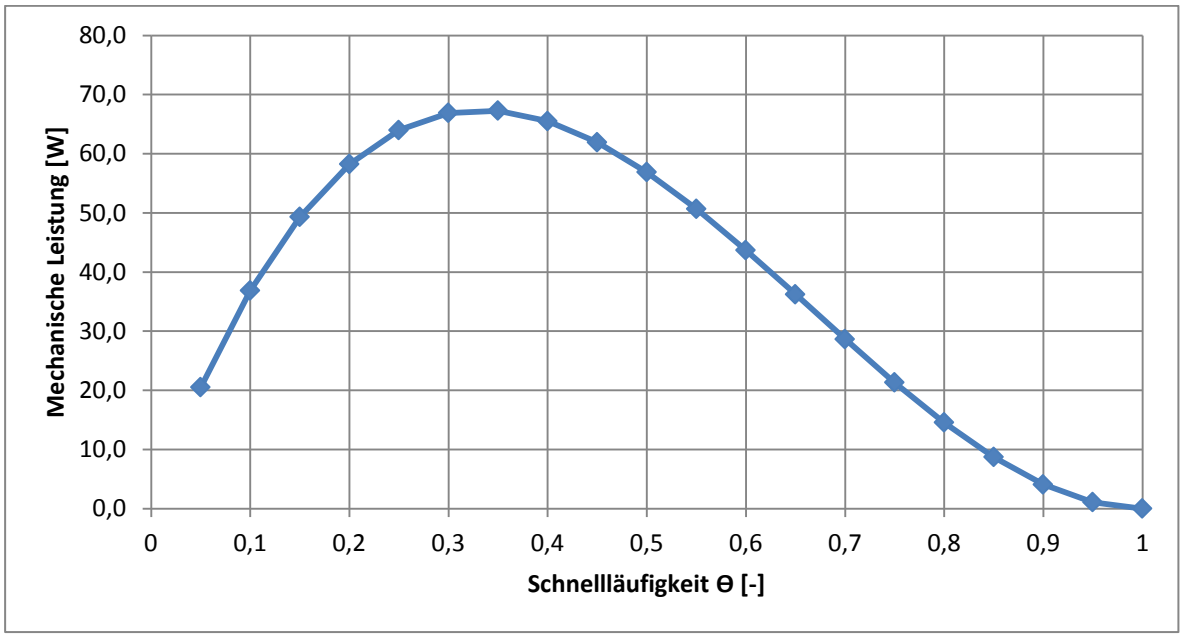


Abbildung 8: Leistungskennlinie bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1m/s

Wie man sieht, befindet sich das Leistungsmaximum von rund 67W bei einer Schnellläufigkeit von ϴ=0,33. Dies entspricht einer Drehzahl von 5,5U/min. Trotz der vergleichsweise geringen Leistung wirkt hier aufgrund der niederen Drehzahl ein erstaunlich hohes Drehmoment von 117Nm, welches sich bis hin zum Stillstand des Wasserrads auf über 260Nm steigert – eine enorme Anforderung an die Festigkeit des Getriebes. In Bezug auf die kinetische Energie bzw. Leistung von 350W, welche in der Strömung am Schaufelquerschnitt zur Verfügung steht, bedeutet die errechnete Leistung des Wasserrads einen maximalen Wirkungsgrad von knapp 20%, was einen typischen Wert für einen Widerstandsläufer darstellt.

2.2 Konzeptionierung

Leichtbauweise, luftgeformt, schwimmend, Pneus und Textilien; all dies sind Schlagworte, die bei der Entwicklung des Konzepts eine Rolle spielten. Abgesehen vom ersten Prototyp von Isabella Pessl wurde damit absolutes Neuland betreten. Aber nicht nur als Kunstwerk sollte dieser Wiederaufgriff alter Technologien - mit völlig neuen Materialien und Konstruktionsweisen - überzeugen, es sollte auch in der Lage sein, eine relevante Menge elektrischer Energie zu erzeugen, um eine Straßenlaterne zu betreiben oder gar als Ladestation für Elektrofahrräder zu dienen. Wie sich im Lauf der Wochen und Monate herausstellte, ist dies genug Stoff für ein umfangreiches Forschungsprojekt.

2.2.1 Standort und Anbringung im Fluss

Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, spielt die Geschwindigkeit des Wassers eine herausragende Rolle für die Energiegewinnung mit einem Flussrad. Bei einer Begehung aller relevanten Abschnitte der meist recht träge dahinfließenden Feistritz in und um Fürstenfeld wurde daher besonders auf diese Größe geachtet. Schließlich wurde eine Stelle identifiziert, die aus mehreren Gründen als am besten geeignet erschien. Etwa 80m stromab des Wehres am Uferweg 14 in Fürstenfeld gelegen, befindet sich die gewählte Stelle noch weit entfernt von der Stauwurzel des nächsten Wehres. Eine kleine Insel in der Flussmitte sorgt für eine Verengung des Flussquerschnitts und damit Erhöhung der Fließgeschwindigkeit. Weiters ist das Ufer über das Grundstück der Familie Schalk, der auch das Wehr mit zugehörigem Kraftwerk gehört, ungehindert von Bäumen oder Büschen bestens zu erreichen. Am gegenüberliegenden Ufer führt ein gut frequentierter Fahrradweg entlang, sodass sich hier der optimale Ort für eine E-Bike-Ladestation findet.

Eine wasserrechtliche Bewilligung war einzuholen, ebenso die Erlaubnis der Familie Schalk, Zugang zum Fluss über ihr Grundstück zu erhalten sowie das Grundstück für die Montagearbeiten vor Ort nutzen zu können. Die Familie Schalk willigte gerne ein und zeigte auch größtes Verständnis für die zahlreichen Verzögerungen und Umbauarbeiten. Sie stellte sogar ihre direkt nebenan gelegene Werkstatt für die Arbeiten am Wasserrad zur Verfügung.

Die genaue Lage des Wasserrades ist in Abbildung 9 mit einem roten Punkt gekennzeichnet. Die Flussrichtung in der Karte verläuft von links oben nach rechts unten. Der Fahrradweg verläuft entlang des oberen Ufers.
Quer über den Fluss wurde ein Trägerseil gespannt und an zwei kräftigen Bäumen befestigt. Es befand sich etwa 3,5m über dem Normalniveau des Flusspegels; gerade genug, um auch bei Hochwasser noch über dem Wasser zu liegen, sodass keine Gefahr bestand, dass es von Treibgut mitgerissen wird.

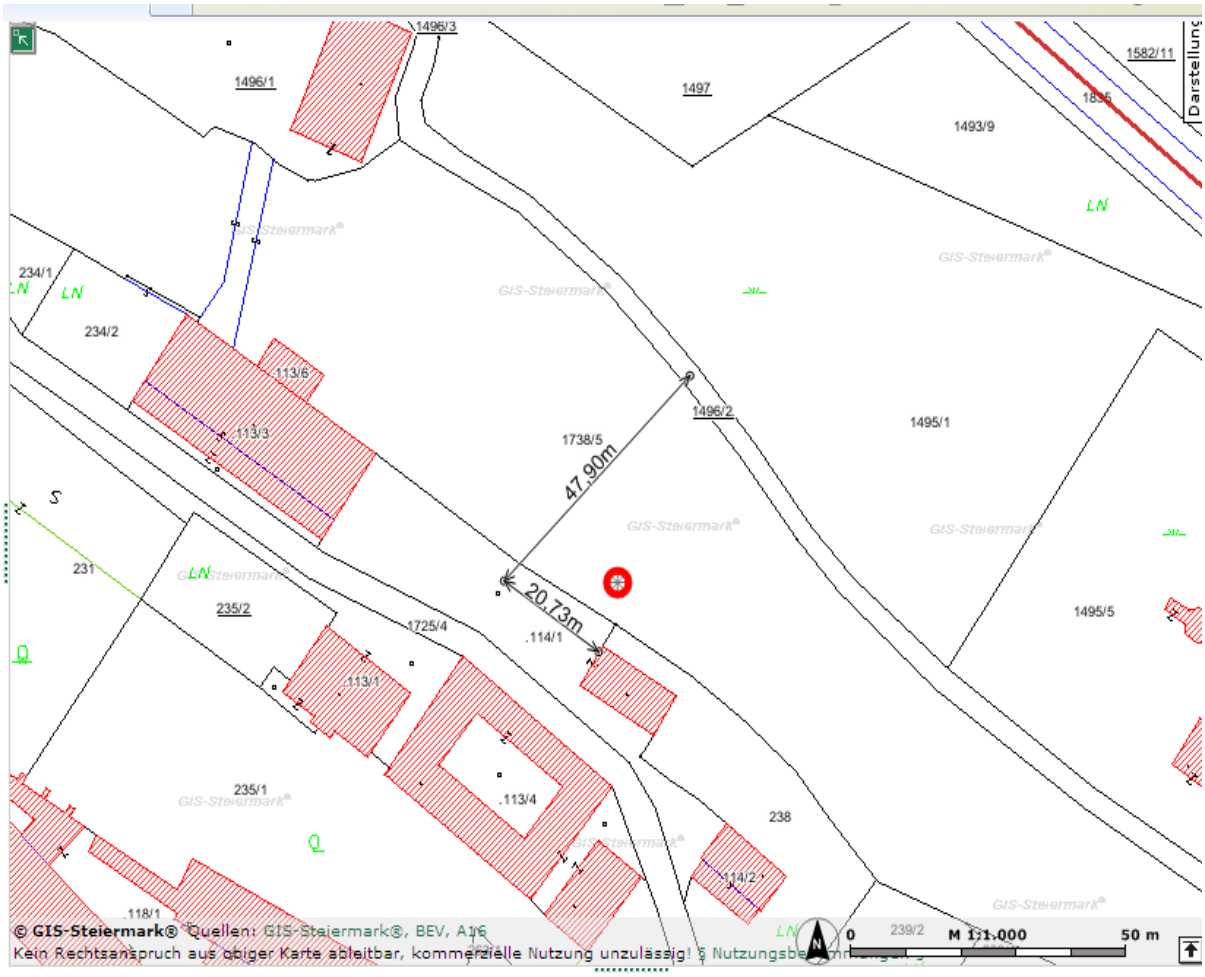


Abbildung 9: Standort mit eingezeichnetem Trägerseil

An diesem Trägerseil wurden zwei weitere Seile befestigt, die mit den Achsenden des Rades verbunden sind, um es in der Strömung an der vorgesehenen Position zu halten.
Über diese Seile wurde auch das Kabel geführt, das die erzeugte elektrische Leistung zum Schaltkasten beim Fahrradweg überträgt.

2.2.2 Das Wasserrad

Eine erste Visualisierung der Grundidee ist in Abbildung 10 zu sehen. Von Anfang an war klar, dass das Rad relativ breit im Vergleich zu seiner Höhe sein muss, um stabil im Wasser zu liegen. Für die Breite des Rades wurden etwa 3-4m veranschlagt.

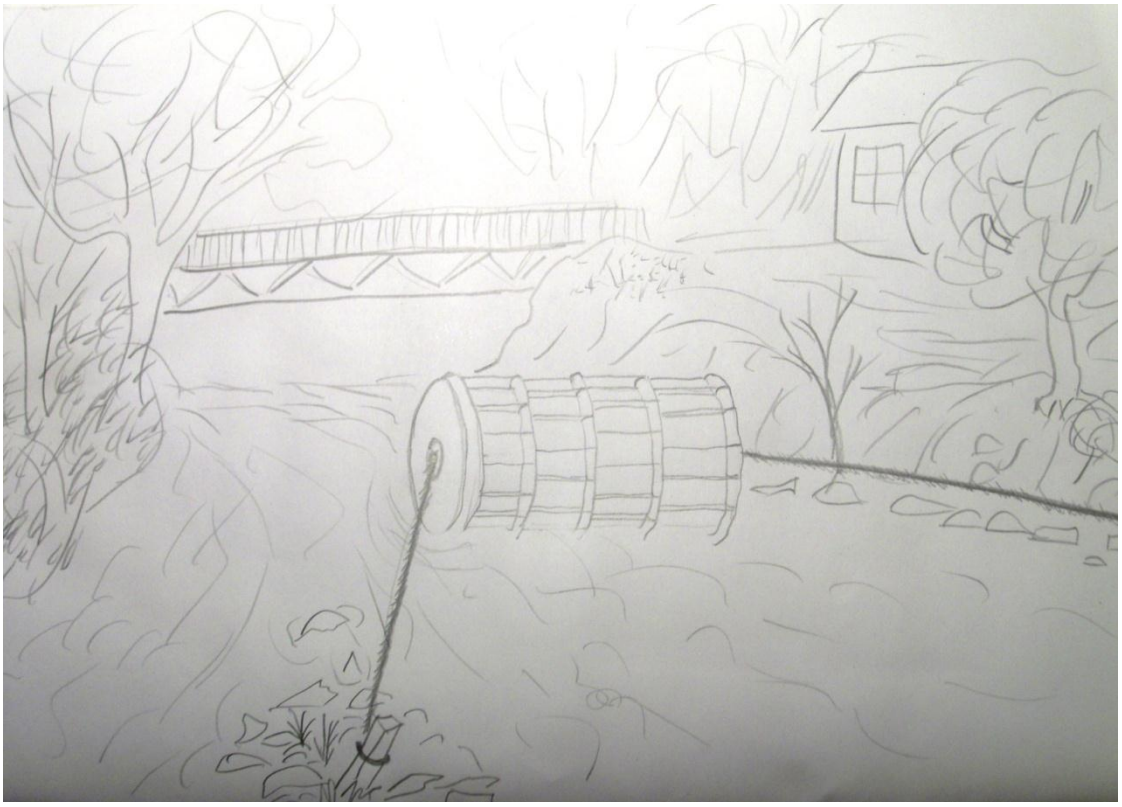


Abbildung 10: Erste Skizze

Die ersten Berechnungen zeigten bald, dass eine Schaufelgröße wie in der obigen Skizze dargestellt bei der gegebenen Fließgeschwindigkeit nicht ausreicht, um nennenswert Energie gewinnen zu können. Das bedeutet also, die Schaufeln müssen größer sein und tiefer ins Wasser eintauchen. Da der gesamte Raddurchmesser nicht beliebig gesteigert werden kann, ist dies gleichbedeutend mit einem tieferen Eintauchen des ganzen Wasserrades. Vom nächsten Entwurf wurde ein 3D-Modell erstellt, welches in Abbildung 11 zu sehen ist.

Wichtig bei der Konzeptionierung war, dass sich die Getriebe-Generator-Einheit im Inneren des Rades befindet, damit keine komplizierte Kraftübertragung auf einen externen Generator erforderlich ist. Schließlich schwimmt das Rad auf dem Wasser und ändert seine Position gegenüber dem Ufer je nach Wasserstand.

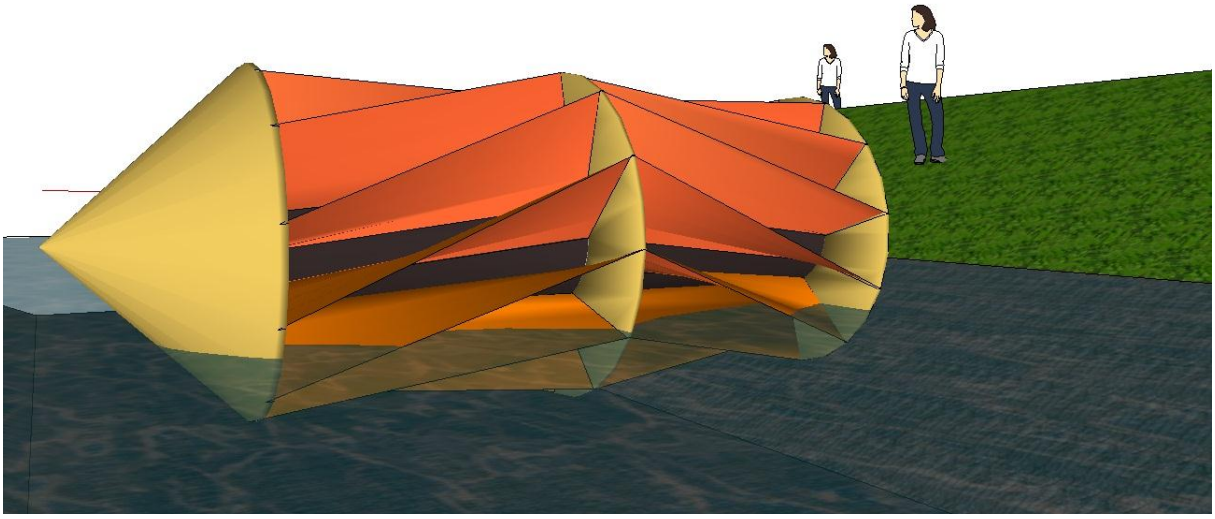


Abbildung 11: 3D-Modell

Um eine gleichmäßige Drehbewegung des Wasserrades zu gewährleisten, ist eine möglichst hohe Anzahl an Schaufeln erforderlich. Eine weitere Maßnahme, um einer ungleichmäßigen Drehung und damit welligen Energieerzeugung entgegenzuwirken, sind die entlang der Drehachse schräggestellten (leicht verdrehten) Schaufelblätter.

Den folgenden Rationalisierungsschritten, insbesondere aber der raschen Umstellung von Modell 1 auf Modell 2, fielen zahlreiche Ideen zum Opfer, so auch die axial schräggestellten Schaufelblätter. Diese wurden aber in Version 3 wieder aufgegriffen und haben sich im Sinne einer gleichmäßigen Drehbewegung sehr gut bewährt.

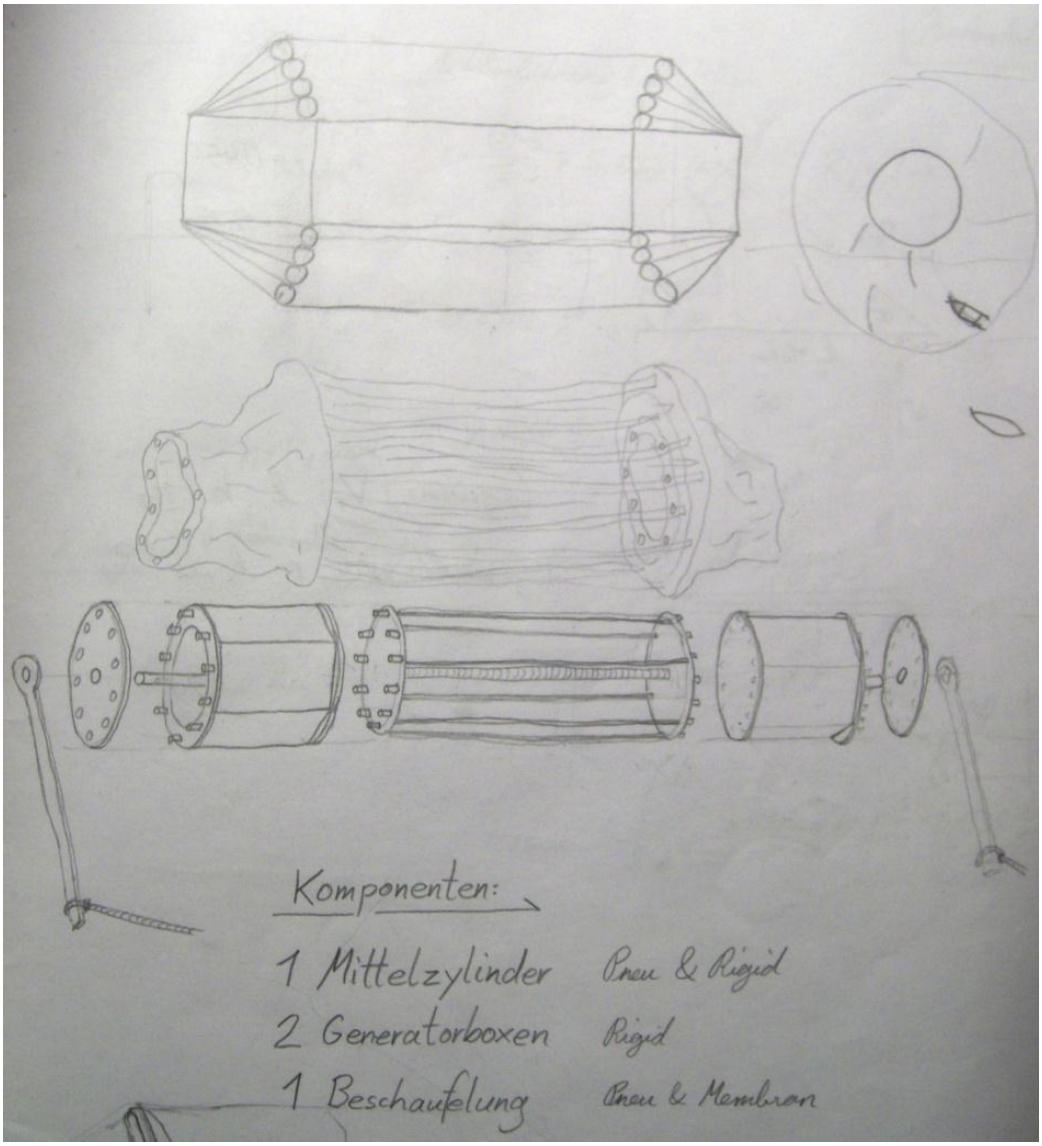


Abbildung 12: Finaler Entwurf des luftgeformten Wasserrades

Abbildung 12 zeigt nun den finalen Entwurf. Oben im Bild ist ein Schnitt durch das Rad zu sehen, darunter sind in einer Explosionszeichnung alle relevanten Komponenten dargestellt. Sie werden in Kapitel 2.3 detaillierter beschrieben. Der Mittelzylinder von Achsende zu Achsende besitzt eine röhren- oder tonnenförmige Gestalt mit 60cm Durchmesser. Darauf aufbauend sitzen die zwei Schwimmkörper bzw. Seitenaufbauten in Form von jeweils vier ineinandergeschobenen aufblasbaren Kreisringen (Tori), welche gleichzeitig als Verankerungspunkte für die Schaufelblätter aus Planen dienen. Verspannungen nach außen leiten die auftretenden Zugkräfte ab.

2.3 Die Komponenten des Wasserrades

Das Wasserrad wurde so konzipiert, dass eine einfache Adaption an unterschiedliche Standorte möglich ist. Die Anpassung an andere Flussbedingungen sollte möglich sein, ohne das komplette Rad neu bauen zu müssen, sondern nur durch Austausch einzelner Komponenten, also insbesondere durch Adaption der Beschaufelung an die Wassertiefe sowie durch die Anpassung des Mittelzylinders an die zur Verfügung stehende Breite des Gewässers. So können technisch aufwändige Komponenten wie die Generatorboxen ohne nennenswerten Umbau in unterschieden Konstellationen bzw. Dimensionierungen des Wasserrads zum Einsatz kommen.

2.3.1 Generatorboxen und Getriebe

Getriebe und Generator sind in das Wasserrad integriert. Die Herausforderung dabei war, diese auf dem beschränkten Platz unterzubringen. Denn das Grundproblem bei Wasserrädern ist die äußerst geringe Drehzahl, in diesem Fall 5 - 8U/min. Die Drehzahlen üblicher Generatoren beginnen aber erst bei etwa 1.000U/min. Experimente mit im Elektrofachhandel erhältlichen kleinen Getriebemotoren erwiesen sich recht schnell als aussichtslos, sodass sich bald herausstellte, dass ein Getriebe selbst gebaut werden musste. Als Generator wurde der Radnabenmotor eines Elektro-Rollers gewählt, da dieser über eine hohe Polpaaranzahl verfügt und bei sehr geringen Drehzahlen betrieben werden kann. Da der Radnabenmotor mit 300 Watt sehr leistungsstark ist und ein einzelner für die Umwandlung der gesamten Leistung ausreicht, wurde die ursprüngliche Idee aufgegeben, an beiden Seiten des Wasserrads jeweils einen Generator anzubringen. So wurde nur auf der (in Strömungsrichtung gesehenen) rechten Seite ein Generator angebracht, mit dem Vorteil, dass nur ein Getriebe gebaut werden musste. Das machte es allerdings erforderlich, das Drehmoment über eine feste Achse von der linken Seite auf die rechte zu übertragen.

Zur Aufnahme der Achslager, als schützende Hülle für Getriebe und Generator und als Basis für die pneumatischen Seitenaufbauten wurden für beide Seiten feste Holzboxen gebaut. Die linke Box trägt lediglich eine frei drehende Achse zur Befestigung des Trägerseils sowie Ausgleichsgewichte. In der rechten Box (Generatorbox) befinden sich Getriebe und Generator.
Die Boxen wurden aus Schalungsplatten (DOKA) in Form sechseckiger Zylinder mit kreisförmigen Deckeln gebaut. Die Fugen beider Boxen wurden von innen und außen mit Silikon abgedichtet, um das Eindringen von Wasser zu verhindern.

Abbildung 13: Linke Box (leer)

Abbildung 14: Generatorbox mit Getriebe

In Abbildung 13 ist die leere Box mit der frei drehenden Achse zu sehen, die links am Rad angebracht wurde. Abbildung 14 zeigt die noch offene Generatorbox mit der Getriebe-Generator-Einheit. Die Boxen sind fest mit dem Wasserrad verbunden und drehen sich mit ihm mit. So dreht sich die Generatorbox um die unbewegte Getriebe-Generator-Einheit. Um dies zu bewerkstelligen, ist das Getriebegehäuse fest mit der nach außen ragenden Achse verbunden. Ein an dieser Achse angebrachter und mit einem eigenen Seil gehaltener Hebel verhindert ein Mitdrehen der Achse. Das Kabel, welches die erzeugte elektrische Leistung zum Schaltkasten an Land überträgt, ist durch die hohle Achse nach außen geführt.
Das Gesamtgewicht der Generatorbox inklusive Getriebe und Generator beträgt knapp 50kg.

Das Getriebe selbst wurde als Kettengetriebe ausgeführt, da ein solches mit recht geringen Kosten und verhältnismäßig einfachen Mitteln im Selbstbau herstellbar ist. Abbildung 15 zeigt die fertige Getriebe-Generator-Einheit für Modell 1 und 2. Sie besitzt zwei Getriebestufen und ein Übersetzungsverhältnis von rund 1:10. Wie sich zeigte, war dieses Übersetzungsverhältnis zu gering, um den Generator bei einem guten Wirkungsgrad zu betreiben. So wurde das Getriebe für Modell 3 um eine weitere Stufe auf drei Stufen erweitert und das Übersetzungsverhältnis auf 1:21 gesteigert.

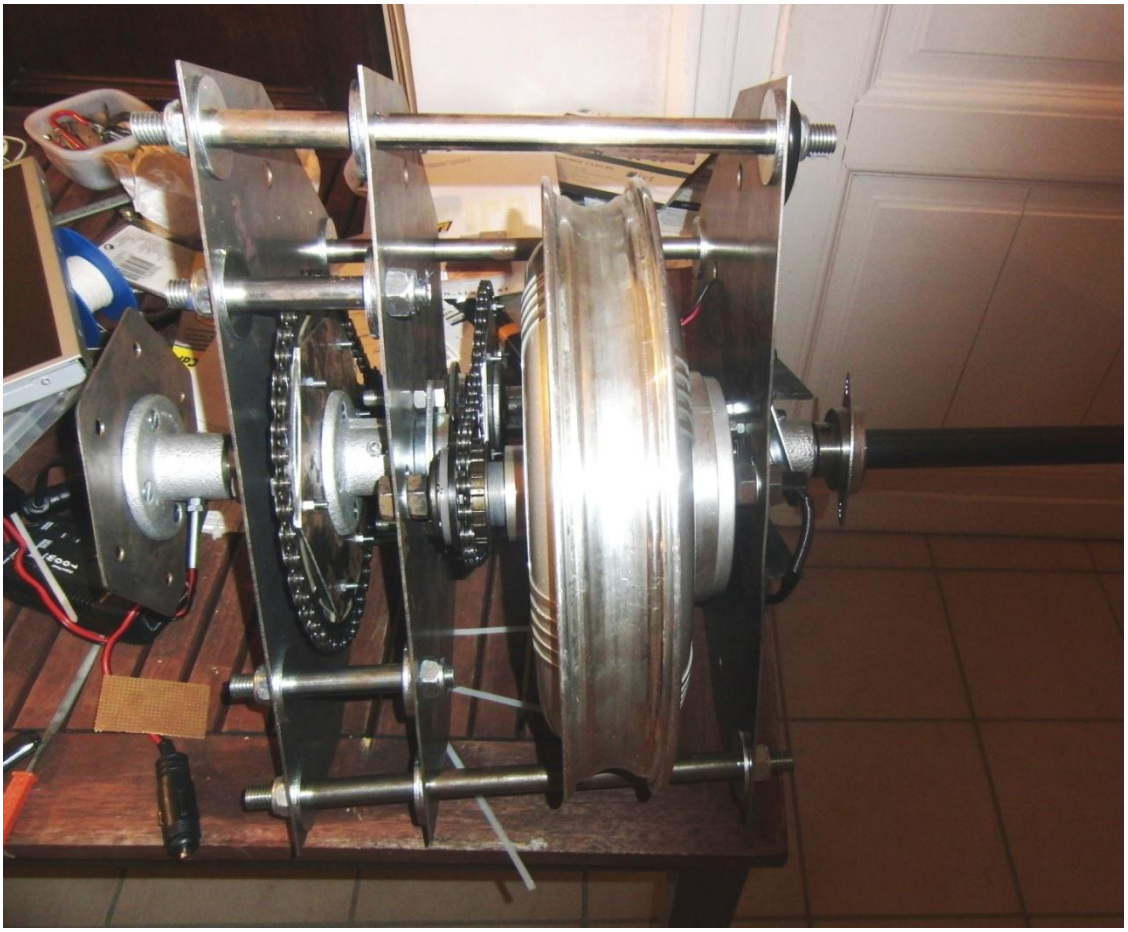


Abbildung 15: Getriebe-Generator-Einheit

Rechts in Abbildung 15 ist die Achse zu sehen, die durch die Generatorbox nach außen geführt wird. Sie ist fest mit dem Getriebegehäuse verbunden. An ihr wird das rechte Trägerseil sowie der Hebel befestigt, der das Mitdrehen des Getriebes mit dem Wasserrad verhindert. Der hochpolige Radnabengenerator befindet sich rechts im Getriebe. Links daneben sind die zwei Übersetzungsstufen. Links aus dem Getriebe ragt die Antriebsachse, über die das Drehmoment vom Wasserrad auf das Getriebe übertragen wird. Sie wird im Drehpunkt an die Innenseite der hölzernen Generatorbox angeflanscht (siehe auch Abbildung 14).

2.3.2 Mittelkörper

Der Mittelkörper verbindet die zwei festen Holzboxen an den Seiten des Rades. Er besitzt eine Länge von 1,8m. Seine Aufgabe ist es, das Drehmoment auf die Seite mit dem Generator zu übertragen, sowie eine stabile und knickfeste Verbindung zu bilden. Die Momentenübertragung wird über die Mittelachse, ein Stahlrohr der Dimension 35x1mm, erreicht, die über aufgeschweißte Flansche mit den Holzboxen verbunden ist.
Die Festigkeit, damit das Rad unter dem großen Druck des Wassers auf die Schaufeln an seiner Mittelachse nicht zusammenklappt bzw. knickt, wird über eine sehr innovative

Konstruktion in Leichtbauweise erreicht, die durch die Prinzipien von Tensairity inspiriert ist [Vgl. TENS07]. Sechs dünne Druckstäbe aus Stahl sind in einen Mantel aus LKW-Plane eingearbeitet, der einen Zylinderförmigen Pneu umschließt. Pneu und Mantel stabilisieren die Druckstäbe so, dass ein Ausknicken praktisch unmöglich ist. Weitere Querverstrebungen oder ein Fachwerkgerüst sind somit nicht notwendig.

Abbildung 16: Mittelkörper während des Zusammenbaus

Abbildung 17: Mittelkörper fertig montiert und aufgeblasen

Abbildung 16 zeigt den Mittelkörper während der Montage. An der linken Holzbox sind die metallenen Befestigungspunkte für die Druckstäbe sowie die bereits angeflanschte Mittelachse zu sehen. Der fertigen Mittelkörper mit den beiden Holzboxen rechts und links ist in Abbildung 17 abgebildet. Hier sind die in den Mantel eingelagerten Druckstäbe gut zu erkennen.

Über die gesamte Projektlaufzeit hat sich der Mittelkörper sehr gut bewährt, lediglich die Beschädigungen der Schaufeln bei Modell 3 verursachten derart ungleichmäßige und ruckartige Belastungen, dass sie über die Stunden bis zur Bergung teilweise zu Beschädigungen an den Befestigungspunkten der Druckstäbe führten.

2.3.3 Schwimmkörper und Seitenaufbauten

Planung und Fertigung der Seitenaufbauten, die sowohl als Schwimmkörper wie auch zur Aufhängungen der Schaufelblätter dienen, erfolgte zunächst als rein luftgeformte, d.h. aufblasbare Struktur (Modell 1). Auf jeder Seite sind vier Kreisring (Tori) größer werdenden Durchmessers derart ineinandergestapelt, dass sie gemeinsam eine kreisscheibenartige, leicht schüsselförmige Gestalt ergeben. Sie sind bei der erwünschten Tauchung von 35cm auf eine Tragfähigkeit von 55kg je Seite ausgelegt, aus PVC geschweißt und jeder Torus mit einem Netzschlauch überzogen, um den für die Stabilität erforderlichen hohen Luftdruck einbringen zu können.

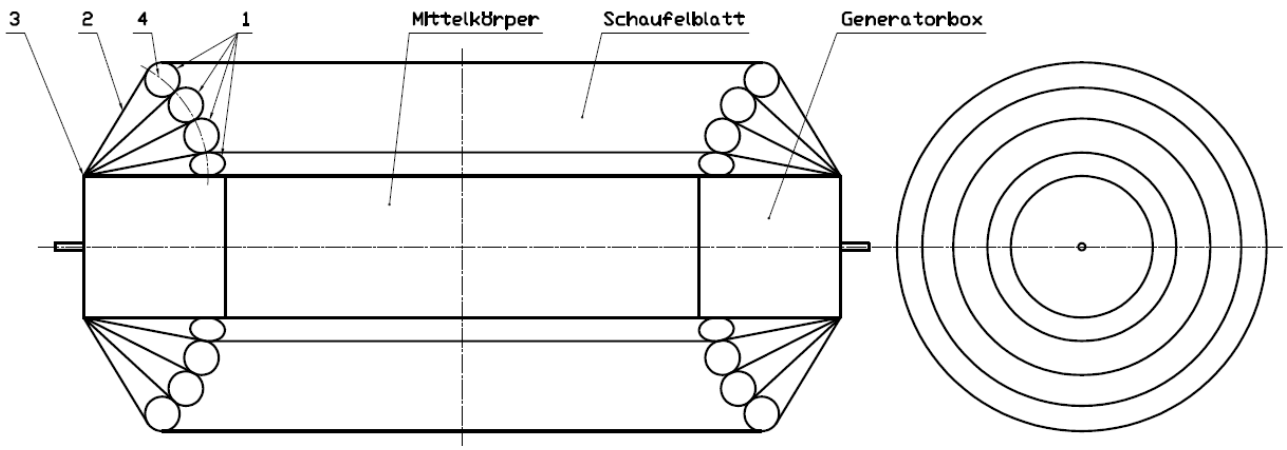


Abbildung 18: Die luftgeformten Seitenaufbauten

Abbildung 18 zeigt einen vereinfachten Schnitt durch das Wasserrad. Die Verbindung der einzelnen Tori (1) sollte über ein Geflecht aus Gurten erfolgen. Zwischen den beiden Seitenaufbauten sollten die Schaufeln gespannt werden, welche über Verspannungen (2) mit Aufhängungspunkten (3) am äußeren Umfang der Holzboxen verbunden sind, um die Zugkräfte durch die Schaufelblätter, die unter dem Druck des Wassers entstehen, hierher abzuleiten. Die Tori (1) sind dabei untereinander so angeordnet, dass sie an jeder Verspannung des Schaufelblattes zu den äußeren Aufhängungspunkten der Holzboxen den selben Abstand besitzen. Ihre Mittelpunkte kommen damit auf der Kreislinie (4) zu liegen, welche ihren Mittelpunkt in den Aufhängungspunkten (3) hat. Sollte also der Zug des Schaufelblattes die Kreisringe aufeinanderpressen und komprimieren, blieben sie dennoch auf der selben Kreislinie (4) und könnten nicht auseinanderrutschen.

Für die Verkleidung der pneumatischen Seitenaufbauten mitsamt den Verspannungen wurden Teile aus LKW-Plane gefertigt, um die Pneus vor Verletzungen durch Treibgut zu schützen und zu verhindern, dass sich Treibgut in den Gurten verfängt und ansammelt.

Aufgrund fertigungstechnischer Probleme wurde diese Variante letztendlich leider nie montiert und erprobt. Stattessen kamen Schaufelaufhängungen aus Holzlatten sowie Schwimmkörper aus Traktorschläuchen zum Einsatz, wie sie in Kapitel 3 eingehend beschrieben werden (Modell 2 und Modell 3).

2.3.4 Beschaufelung

Eine der wichtigsten Komponenten eines Wasserrades sind die Schaufeln. Sie bilden die Schnittstelle zwischen der linearen Bewegung der Wasserströmung und der Drehbewegung des Rades und sitzen somit praktisch am Übergang von natürlich-physikalischer zu technisch gewollter Bewegung.
Wie in Kapitel 2.1 gezeigt, ist Form und Anordnung der Schaufelblätter maßgebend für die Dimensionierung sowie die Wahl der Proportionen aller anderen Komponenten des Wasserrades. Die Schaufelblätter selbst werden wiederum anhand der Strömungsverhältnisse entworfen.
Als Kompromiss zwischen einem ruhigen Lauf des Rades (hohe Schaufelanzahl) und einer ökonomischen Fertigung (niedrige Schaufelanzahl) wurde eine Anzahl von neun Schaufeln für das Rad gewählt.

Die Schaufelblätter wurden aus einem PVC-beschichteten Gewebe aus Polyester (vulgo LKW-Plane) gefertigt. Dieses Material besitzt eine extrem hohe Zugfestigkeit und Witterungsbeständigkeit. Die Schaufelblätter werden zwischen den Seitenaufbauten verspannt.

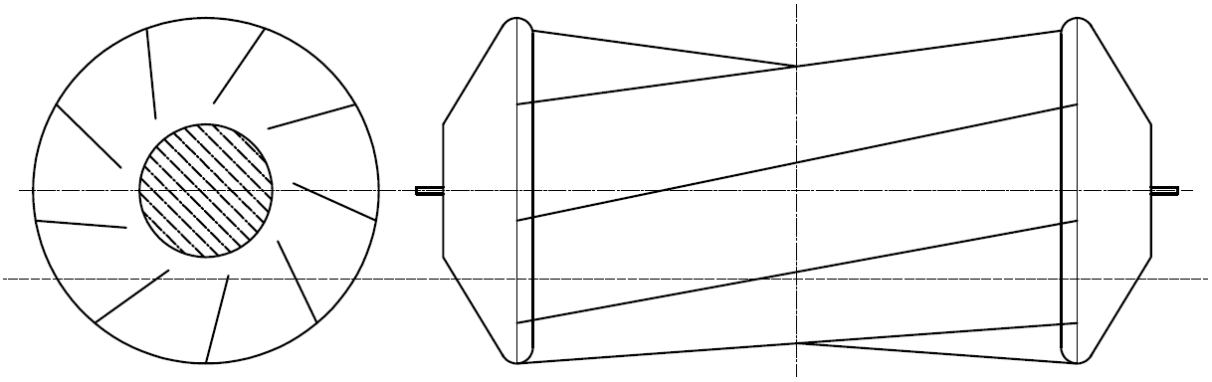


Abbildung 19: Anordnung der textilen Schaufelblätter

Abbildung 19 zeigt Modell 1 mit den Schaufeln, links in der Seitenansicht (die Strömungsrichtung verläuft von links nach rechts) und rechts aus Strömungsrichtung

gesehen. Die Wasserlinie ist als gestrichelte Linie im unteren Bereich eingezeichnet. Auf der linken Seite der Abbildung ist der Anstellwinkel der Blätter zu sehen, der Schaufelwinkel β_S=75°, wie er sich aus den hydrodynamischen Berechnungen ergab.
Auch zur Drehachse des Rades sind die Schaufelblätter schräg gestellt, wie der rechte Teil der Abbildung 19 zeigt. Die Aufhängungspunkte für die Schaufelblätter stehen sich auf beiden Seitenaufbauten genau gegenüber. Die Schaufeln sind jedoch von links nach rechts zum jeweils in Drehrichtung eins zurückliegenden Aufhängungspunkt gespannt. So ergibt sich die leicht schraubenförmige Gestalt der Beschaufelung. Diese Anordnung wurde im Sinn eines möglichst gleichmäßigen Laufs gewählt. Im Lauf der Drehung des Rades tauchen die einzelnen Schaufeln so nicht auf einen Schlag ins Wasser ein, sondern die Vorderkante verschwindet kontinuierlich unter der Wasseroberfläche. Wenn ein Schaufelblatt den Eintauchvorgang vollständig abgeschlossen hat, beginnt bereits das nächste damit.

Abbildung 20: textiles Schaufelblatt

Die obige Abbildung 20 zeigt ein textiles Schaufelblatt während der Fertigung. Die seitlichen Befestigungslaschen sind in dieser Abbildung noch nicht umgenäht.
Durch ihren Zuschnitt und entsprechende Nähte bilden die Schaufeln in der Strömung eine becher- bzw. trogförmige Gestalt aus, was zu einem verbesserten Einströmen des Wassers in den Schaufelraum und zu einem hohen Widerstand im Wasser (c_w-Wert) und damit möglichst großem Wirkungsgrad führt.
Seitlich sind die Schaufelblätter mit Laschen versehen, die der Befestigung dienen. Ihre Form wurde auf die Seitenaufbauten von Modell 1 optimiert, sodass bei den späteren Prototypen bei der Befestigung der Schaufeln improvisiert werden musste.

2.4 Schaltkasten – Inselsystem

Beim Fahrradweg am nördlichen Ufer der Feistritz wurde ein Schaltkasten angebracht. Er war auf einen eigens errichteten Laternenpfahl montiert, dessen Lampe mit der Energie des Wasserrades betrieben wurde (siehe Abbildung 21).

Abbildung 21: Schaltkasten mit Laterne, Bildschirm und Steckdose

Die elektrische Ausrüstung des Schaltkastens wurde als Inselsystem konzipiert. Als Zwischenspeicher dient eine große Autobatterie mit einer Kapazität von 110Ah. Über einen elektronischen Laderegler, der automatisch den optimalen Betriebspunkt sucht, wird die Batterie vom Wasserrad beladen und speist einen Mini-Computer (Raspberry Pi), einen kleinen Bildschirm, eine Steckdose für Wechselstrom sowie in der Nacht die Straßenlampe.
Der Computer ist mit einer umfangreichen Messelektronik ausgestattet, um die aktuelle Leistung des Wasserrades, Ladestand der Batterie und Leistung der Verbraucher zu analysieren, die Daten zu sammeln und über eine kabellose Internet-Verbindung auch online für Monitoring-Zwecke verfügbar zu machen. Außerdem zeigt er auf dem Bildschirm die wichtigsten Daten sowie Fotos und Graphiken über das Wasserrad an.

3 Umsetzung und Entwicklungsverlauf

Abbildung 22 zeigt die wichtigsten zeitlichen Daten zum Projektverlauf von März bis August 2012. Da es sich um ein Projekt zur experimentellen Forschung handelt, wurde sowohl in Konzeption und Planung als auch in der Materialauswahl absolutes Neuland betreten. So ist es kaum verwunderlich, dass im Lauf der Zeit Adaptionen am Ursprungsmodell (Modell 1) erforderlich wurden, um auf die sich eben erst in der Praxis zeigenden Schwierigkeiten, unvorhersehbaren Anforderungen und neuen Erkenntnisse einzugehen.

10.03.	Erstbegehung Feistritz und Standortauswahl
14.04.	Messung der Fließgeschwindigkeit
15.04. bis 09.06.	Konzeption, Entwurf und Planung Modell 1
10.06. bis 02.07.	Fertigung der Komponenten Modell 1 in Wien
03.07.	Start Zusammenbau in Fürstenfeld
04.07. bis 06.07.	Neuentwurf und Bau Modell 2, Installation in der Feistritz
07.07.	Eröffnung der Wasserbiennale
08.07.	Bergung Modell 2
11.07. bis 23.07.	Neuentwurf und Bau Modell 3 in Wien
24.07. bis 01.08.	Zusammenbau Modell 3 in Fürstenfeld
04.08. bis 08.08.	Installation und Betrieb Modell 3 in der Feistritz
09.08.	Bergung Modell 3

Abbildung 22: Zeittafel zum Projektverlauf von März bis August 2012

Kurz nach dem Start des Zusammenbaus der Komponenten vor Ort in Fürstenfeld stellte sich heraus, dass die rein pneumatischen, d.h. aufblasbaren, luftgeformten Seitenaufbauten aufgrund von Materialproblemen nicht zum Einsatz kommen konnten. So musste kurzfristig eine andere Lösung gefunden werden, die noch rechtzeitig zur Eröffnung der Wasserbiennale beim Installationsort des Wasserrades an der Schalkmühle in Fürstenfeld fertiggestellt werden konnte. Dieser Aufbau wird im Folgenden als Modell 2 bezeichnet. Einen Tag nach den Eröffnungsfeierlichkeiten zeigte sich jedoch, dass dieser improvisiert Aufbau der ständig wechselnden Belastung während jeder Umdrehung des Wasserrades nicht lange standhalten konnte. Auch war der elektrische Output nicht zufriedenstellend und weit hinter den Berechnungen zurückgeblieben. So folgte eine längere Phase von Neuplanung und Neubau sowohl des Getriebes als auch der Seitenaufbauten. Das Ergebnis ist Modell 3, welches Anfang August in der Feistritz installiert wurde. Die Fehler der vorangegangenen Modelle konnten damit zwar vollständig behoben werden, doch zeigten sich im Dauerbetrieb neue Probleme an den nun schwächsten Teilen: den Schaufelaufhängungen.

Eine genaue Beschreibung der verschiedenen Modelle findet sich in den hier folgenden Unterkapiteln. Eine Analyse der Probleme und Lösungen, die neuen Erkenntnisse und weitere Lösungsvorschläge sind in Kapitel 4 dargestellt.

Die Fertigung der einzelnen Komponenten erfolgte fast vollständig durch eigene Arbeit der Projektmitglieder. Sie wurde in verschiedenen Werkstätten in Wien durchgeführt. Neben der Hauptwerkstatt im Haus der Familie Massiczek sind hier zu nennen die Textilwerkstatt der Akademie für Bildenden Künste in Wien, die Metallwerkstatt der Akademie für Bildende Künste in Wien, die Metallwerkstatt im Wiener WUK (Werkstätten- und Kulturhaus) sowie die Textilwerkstatt an der Universität für Angewandte Künste in Wien, wo auch das Hochfrequenz-Schweißgerät von experimonde | die Welt der Experiments für die Fertigung der Pneus zur Verfügung stand.
Zusammengebaut wurden die Komponenten vor Ort in Fürstenfeld, auf dem Gelände und in der Werkstatt der Familie Schalk.

3.1 Modell 1: rein pneumatische Seitenaufbauten

Modell 1 entspricht dem ursprünglichen Anspruch, ein weitestgehend luftgeformtes Wasserrad zu entwickel. Konzeption, Berechnungen, Entwurf und Planung wurde in Kapitel 2 bereits ausführlich beschrieben. Alle Komponenten wurden in Wien gefertigt und am 03.07.2012 nach Fürstenfeld zur Montage gebracht. Dort musste dann jedoch festgestellt werden, dass die aufblasbaren Kreisringe (Tori) für die Seitenaufbauten nicht zum Einsatz kommen konnten. Offenbar hatte sich beim Schweißen die für den erforderlichen Anpressdruck verantwortliche Schraube unbemerkt verdreht. Es gelang danach schlichtweg nicht, alle undichten Stellen dicht zu bekommen.
So wurde Modell 1 leider nie fertig aufgebaut und in der Praxis erprobt.

3.2 Modell 2: Rigid verstärkte Seitenaufbauten

Da sich drei Tage vor der Eröffnung der Wasserbiennale (Eröffnungstag 07.07.2012) herausstellte, dass die luftgeformten Seitenaufbauten ungeeignet waren, musste rasch eine Alternative entworfen werden. Diese fand sich in der Planung und Fertigung neuer Seitenaufbauten aus hölzernen Baulatten, die in ihrem Inneren Schwimmkörper in Form von Schläuchen für Traktorreifen enthalten. Abbildung 23 zeigt eine Fotographie dieser neuen Anordnung während des Baus. Mittelkörper und Generatorboxen wurden wie gehabt weiterverwendet.

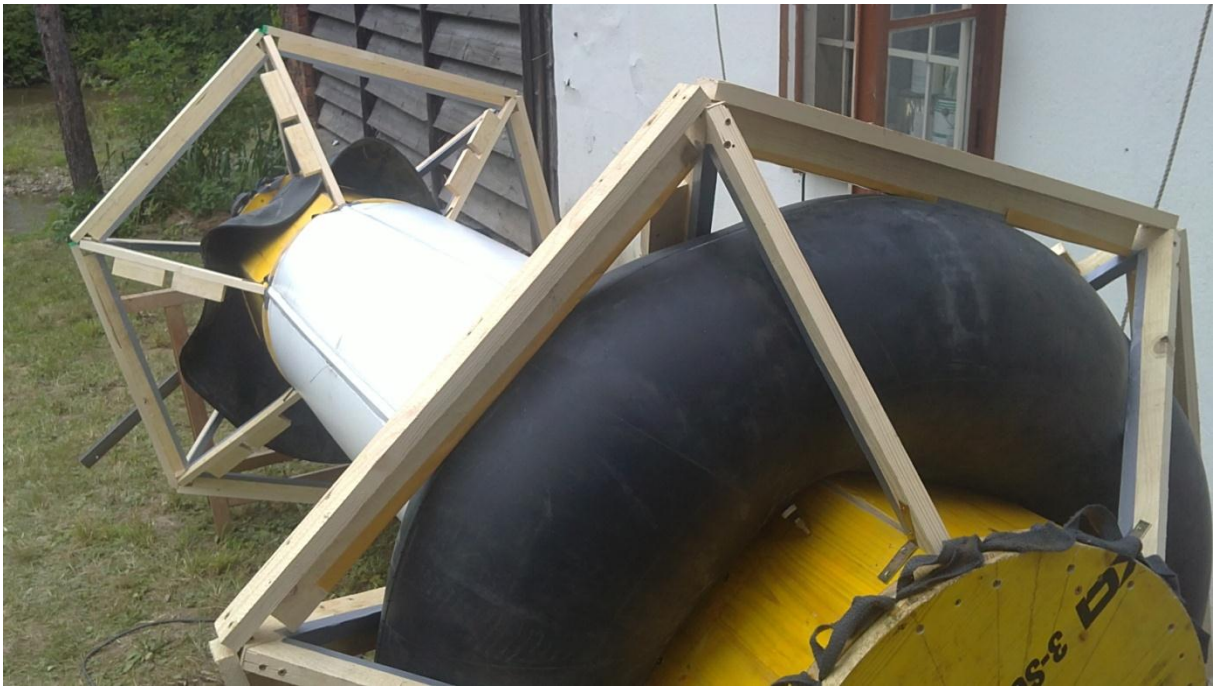


Abbildung 23: neue Seitenaufbauten

Die Baulatten wurden mittels Holzschrauben miteinander verbunden und mit Stahlwinkeln an den Generatorboxen angebracht. Da die sechseckigen Generatorboxen die Basis für diesen Aufbau bildeten, mussten auch die neuen Seitenaufbauten in einer sechseckigen Form ausgeführt werden, um nicht zu viele unterschiedliche Längen aus den Baulatten zuschneiden zu müssen. Dies führte dazu, dass nun nur mehr Aufhängungspunkte für sechs Schaufelblätter verfügbar waren. Die geplante Schrägstellung der Blätter entlang der Drehachse war nicht mehr möglich. Ebenso konnte der geplante Schaufelwinkel β_S von 75° nicht mehr eingehalten werden, die Schaufelblätter wurden nun mit einem Winkel von 90°, also genau radial, mit Gurten an der Holzlattenkonstruktion verschnürt. Anschließend wurden die Seitenaufbauten mit Teilen aus LKW-Plane verkleidet, um den Schutz vor Treibgut und eine einheitliche Optik zu gewährleisten.

Rechtzeitig zur Eröffnung der Wasserbiennale konnte Modell 2 fertiggestellt, in Betrieb genommen und an den Schaltkasten angeschlossen werden. In Abbildung 24 ist das Wasserrad am Tag der Eröffnungsfeierlichkeiten zu sehen. Die Besucher konnten es in Kanus aus nächster Nähe betrachten.

Abbildung 24: Modell 2 in Betrieb

Die Veränderungen gegenüber Modell 1 führten zu einigen ungewollten Verhaltensweisen des Rades. Zwei Hauptprobleme stellten sich ein:

- Durch den veränderten Anstellwinkel der Schaufelblätter in radialer und axialer Richtung sowie dadurch, dass damit der vorgesehene Spalt zwischen Schaufeln und Mittelkörper wegfiel, förderten die Schaufeln große Mengen Wassers beim Auftauchen mit in die Höhe. Dies führte zu einer sehr geringen Drehzahl und zu großen Verlusten in der Leistung. Dieses Problem konnte noch während der Inbetriebnahme durch zusätzliche Verspannungen durch die Mitte der Schaufelblätter behoben werden, wie sie in Abbildung 24 zu sehen sind. Sie verhindern, dass die trogförmige Gestalt der Schaufeln beim Auftauchen gegen die Drehrichtung umklappt und Wasser mit nach oben hebt.

- Das Wasserrad bewegte sich recht ungleichmäßig. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Anzahl an Schaufelblättern und daran, dass sie entlang der Drehachse nicht schräggestellt sind. Ebenso spielt die von der Kreisform abweichende, sechseckige Form der Seitenaufbauten eine Rolle. Die Drehbewegung war somit wellig; bei jeder Umdrehung gab es sechs „Beschleunigungs-Stöße“, wenn eines der Schaufelblätter voll in der Strömung stand.

Die wellige Drehbewegung führte zu einer ruckartigen Belastung der Seitenkörper und zu einer Welligkeit im elektrischen Output. Überdies blieb die elektrische Leistung weit hinter den Erwartungen zurück. Sie betrug nur 2 - 5 Watt. Als Ursache wurde die zu geringe Übersetzung des Getriebes identifiziert. Der Generator lief unterhalb seiner Auslegungsdrehzahl und damit bei einem sehr geringen Wirkungsgrad. Die ohnehin geringe Leistung führte aufgrund der kleinen Ausgangsspannung am Generator zu extrem hohen Verlusten über das etwa 60m lange Kabel bis zum Schaltkasten.

Schon einen Tag nach der Eröffnung der Biennale zeigte sich, dass diese unter großem Zeitdruck entwickelte Konstruktion der dauerhaften Belastung im Einsatz nicht standhalten konnte. Die Umdrehungsgeschwindigkeit von ca. 6 U/min führt zu etwa 10.000 Umdrehungen innerhalb von 24 Stunden und damit zu einer entsprechend hohen Anzahl an wechselnden Belastungen auf die Konstruktion bei jedem Eintauchen eines Schaufelblatts. Dies entspricht etwa einem vollständigen Belastungstest für Möbelstücke über die gesamte Lebensdauer.
So kam es rund 36 Stunden nach der Inbetriebnahme zu einer Beschädigung des linken Schwimmkörpers. Der Traktorschlauch hatte sich an einem Berührungspunkt mit den Baulatten aufgescheuert und Luft verloren. Eine genauere Untersuchung nach der Bergung des beschädigten Wasserrads zeigte, dass auch die Holzlattenkonstruktion der Seitenaufbauten im Begriff war, sich aufzulösen. Einzelne Schrauben hatten sich aus dem Holz gelöst oder waren gar abgebrochen.

3.3 Modell 3: Verbesserte Seitenaufbauten und modifiziertes Getriebe

Die Erkenntnisse aus dem Betrieb von Modell 2 machten eine grundsätzliche Überarbeitung erforderlich. Die aufgetretenen Probleme, die zu lösen waren, sind:

- Aufscheuern der pneumatischen Schwimmkörper an den festen Bestandteilen des Wasserrads,
- Zerstörung der rigiden Seitenaufbauten durch die wechselnde Belastung während der Umdrehung des Rades,
- geringe elektrische Leistung des Generators durch wellige Drehbewegung und zu geringe Übersetzung des Getriebes.

Nun stand etwas mehr Zeit zur Verfügung, um diese Fehler in einer Neukonzeption zu vermeiden. Es wurde in Betracht gezogen, zur ursprünglichen Idee mit rein luftgeformten Seitenaufbauten zurückzukehren. Aufgrund der Erfahrungen mit der ungeheuren, zermürbenden Kraft des Wassers und auf Basis der Ergebnisse einiger Modellversuche wurden diese Überlegungen jedoch wieder aufgegeben. Die Entscheidung für die nun

ausgeführte Variante fiel nicht zuletzt deswegen, da man eine potentiell verlässlichere Lösung einer experimentellen zum gegenwärtigen Zeitpunkt des Projekts vorzog.

Unabhängig von den Seitenaufbauten wurde das Getriebe modifiziert. Mit einiger Feinarbeit konnte eine zusätzliche (dritte) Getriebestufe in das bestehende Getriebegehäuse eingebaut werden. Das Übersetzungsverhältnis wurde so von 1:10 auf gut 1:21 gesteigert. Da sich so das Moment an der Antriebswelle des Getriebes deutlich steigerte, wurden einige Modifikationen an den einzelnen Bauteilen notwendig, bis das Getriebe in der Lage war, das vollständige Stillstandsmoment, etwa bei einer Blockade des Generators, in Höhe von bis zu 300 Nm aufzunehmen. Dies reicht an die Drehmomente heran, die etwa im Automobilbau üblich sind. Der Unterschied zum Wasserrad liegt in dessen deutlich geringeren Leistung, bedingt durch die niedrige Drehzahl.
Die folgende Abbildung 25 zeigt das modifizierte 3-stufige Getriebe während des Einbaus.

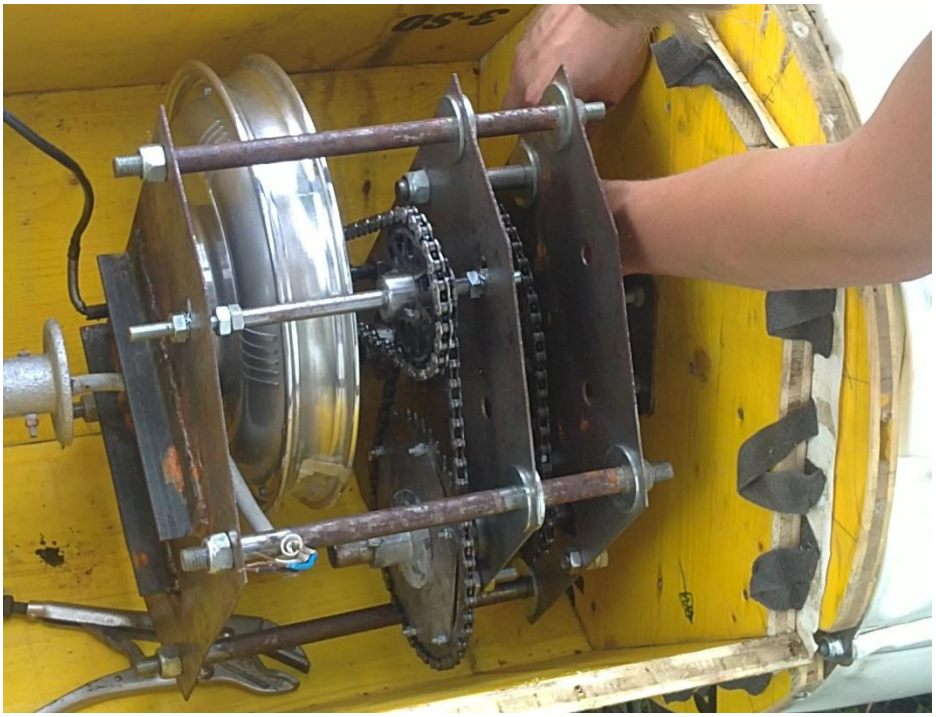


Abbildung 25: 3-stufiges Kettengetriebe

Die neuen Seitenaufbauten wurden für die ursprünglich geplante Anzahl von 9 Schaufelblättern ausgelegt. Es wurde eine verhältnismäßig massive Konstruktionsweise gewählt, welche in Abbildung 26 dargestellt ist. Sie besitzt einen Gesamtdurchmesser von 158cm.

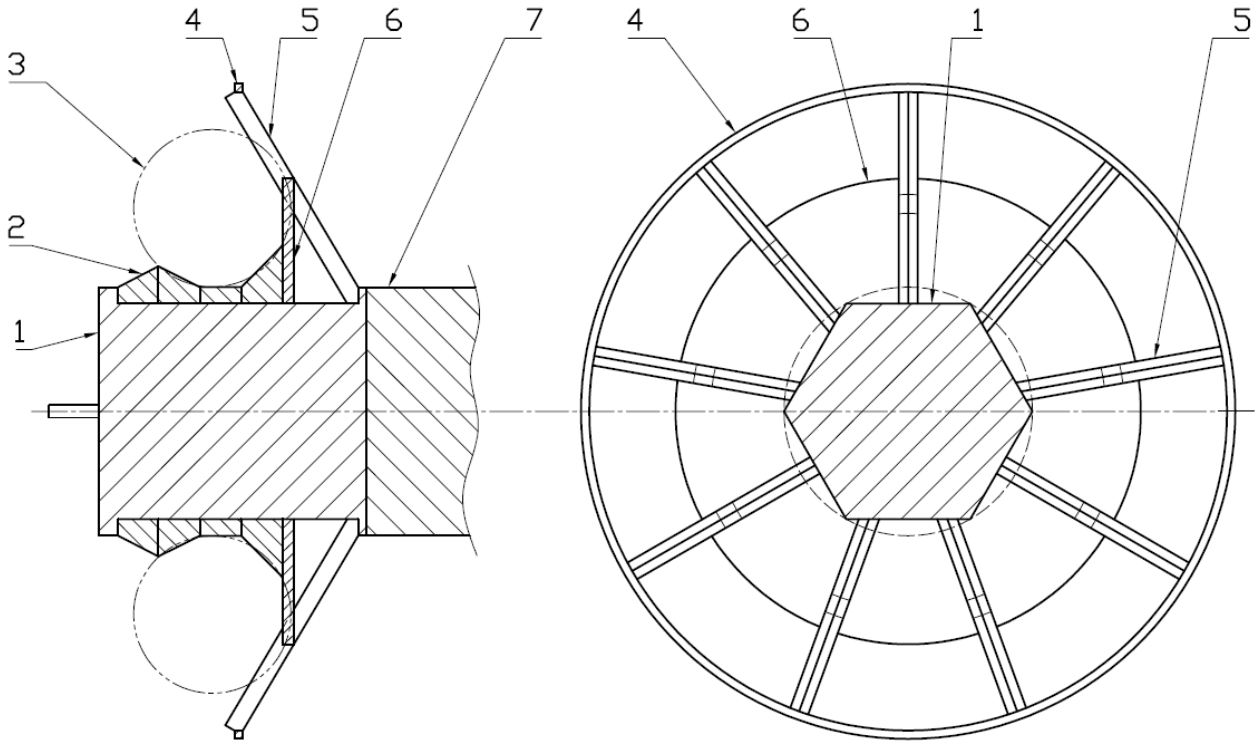


Abbildung 26: Seitenaufbauten Modell 3

Auf die bestehenden Holzboxen (1) wurde eine Kreisscheibe (6) aus Schalungsplatten aufgesetzt. Sie stützt die doppelten Holzlatten (5) aus feuchtigkeitsbeständigem Lärchenholz (23x43 mm). Am Außenumfang wird die Konstruktion von einem eisernen Kreisring (4) eingefasst (Vierkantprofil 20x20x1,5mm, Außen-Ø=1580mm). Der gesamte Aufbau befindet sich auf der dem Mittelkörper (7) zugewandten Seite der Holzboxen (1).
Für den aufblasbaren Schwimmkörper (3) (Traktorreifen-Schlauch) wurde eine Felge (2) aus XPS-Teilen in vier verschiedenen Geometrien auf die Holzboxen (1) aufgesetzt. Die gesamte rigide Konstruktion, bestehend aus Schalplatten (6), Lärchenholz-Latten (5) und Eisenring (4), wurde im Gegensatz zur Holzkonstruktion von Modell 2 nur einseitig konzipiert, um den Schwimmkörper (3) nicht von allen Seiten einzuschließen und so die Problematik des Scheuerns von luftgeformten an starren Teilen zu minimieren.

Für eine feste Verbindung der Einzelteile sorgen starke Stahlwinkel. Da sich die Holzschrauben in Modell 2 nicht bewährt hatten, wurden nun durch das Holz durchgeführte Maschinenschrauben und Torbandschrauben mit Sicherheitsmuttern verwendet. Insgesamt kamen so rund 100 Winkel- und Flachstahlteile sowie knapp 600 Schrauben mit Muttern zum Einsatz. Mit allen zusätzlichen Teilen steigerte sich damit das Gewicht von knapp 110kg bei Modell 1 auf ein Gesamtgewicht von über 170kg bei Modell 3.

Abbildung 27: Montage Seitenaufbauten

Abbildung 28: Detail Verschraubung

In Abbildung 27 sieht man Modell 3 während der Montage der Seitenaufbauten mit der noch offenen Generatorbox. Abbildung 28 zeigt eine Detailaufnahme der Verschraubungen.
Um die Schwimmkörper möglichst schonend zu lagern, wurden Felgen auf die Holzboxen aufgesetzt. Sie sind aus 10cm starken XPS-Dämmplatten zugeschnitten. Abbildung 29 zeigt die Felgen-Elemente während der Montage.
Zusätzlich wurden die Traktorreifen-Schläuche der Schwimmkörper in einen Mantel eingenäht. Er schützt einerseits den weichen Gummi vor dem Durchscheuern und sorgt andererseits dafür, dass er mit hohem Druck aufgeblasen werden kann und dabei das vorgegebene Volumen behält.

Abbildung 29: Montage Felgen

Abbildung 30: Schwimmkörper und Schaufelblätter

In Abbildung 30 sind die Schwimmkörper bereits montiert, ebenso die textilen Schaufelblätter. Da eine neue Anfertigung zu aufwändig gewesen wäre, wurden die selben Schaufelblätter verwendet, die für Modell 1 geplant und angefertigt waren. Daher passen sie nicht perfekt zu den neuen Seitenaufbauten und bei der Befestigung musste improvisiert

werden. Allerdings konnten nun alle neun Schaufeln verwendet werden. Sie sind durch ihre seitlichen Befestigungslaschen mit Seilen und Gurten an den Lärchenholz-Latten verspannt. Eine leichte Schrägstellung entlang der Drehachse im Sinn einer gleichmäßigen Drehbewegung wird dadurch erreicht, dass die Seitenaufbauten um 20° zueinander verdreht sind.
Konstruktionsbedingt war es nicht möglich, die Schaufeln auf den optimalen (radialen) Anstellwinkel bzw. Schaufelwinkel β_S=75° einzustellen, da die Speichen, die ja auch für die Schaufelaufhängung benutzt werden, genau radial angeordnet sind, um für maximale Stabilität zu sorgen. Der Schaufelwinkel β_S beträgt damit wie bei Modell 2 genau 90°. So wurden ebenfalls Gurte durch die Mitte der Schaufeln gespannt, die verhindern, dass sie gegen die Laufrichtung umklappen und beim Auftauchen Wasser in die Höhe fördern.
Wie beim Vorgängermodell erhielten die Seitenaufbauten eine Verkleidung aus LKW-Plane.

Abbildung 31: Modell 3 in Betrieb

Nach den Umbauarbeiten wurde Modell 3 am 01.08.2012 fertiggestellt. Da die Feistritz aber gerade Hochwasser führte, musste bis zum 04.08. gewartet werden, bis eine sichere Installation im Fluss möglich war. Das Wasserrad in Betrieb ist in Abbildung 31 zu sehen, rechts davon der Mast mit Schaltkasten und Straßenlaterne am Tag der Inbetriebnahme.

Die Neukonzeption war ein Erfolg. Alle am Anfang dieses Kapitels beschriebenen Fehler von Modell 2 konnten behoben werden. Die Seitenaufbauten hielten nun, ebenso die aufblasbaren Schwimmkörper. Das Rad drehte sich sehr gleichmäßig mit rund 8 U/min und beschleunigte den Generator über das modifizierte Getriebe in einen brauchbaren Leistungsbereich. Die Leerlaufspannung am Schaltkasten erreichte gut 30 Volt. Nach der Installation wurde kurzzeitig eine elektrische Last angeschlossen, die einen Strom von 2,5 Ampere aufnahm. Die Ausgangsspannung des Generators am Schaltkasten sank dabei auf

20 Volt. So konnte über mehrere Minuten eine konstante Leistung von rund 50 Watt gemessen werden.
Da die elektronische Ausstattung des Schaltkastens jedoch noch nicht angepasst war, wurde das Wasserrad im Anschluss direkt an die Straßenlaterne angeschlossen, welche zwei in Reihe geschaltete LED-Lampen (12V, 3W) enthielt.

Leider währte trotz aller Verbesserungen auch bei Modell 3 die gesamte Betriebsdauer nicht sehr lange. Nach fünf Tagen, noch bevor die Elektronik einsatzbereit war, musste das Wasserrad erneut aufgrund von Beschädigungen geborgen werden. Etwa vier Tage nach der Inbetriebnahme zeigten sich Schäden an den Befestigungen der Schaufelblätter. Infolge zigtausender wechselnder Belastungen, die bei jedem Eintauchen auf die Schaufeln wirken, hatten sich die Seile und Gurte durch mehrere Befestigungslaschen der Schaufelblätter gescheuert, die Schaufelblätter begannen sich zu lösen.
Noch die kleinste Bewegungsfreiheit an den Befestigungspunkten scheint hier verhängnisvoll. Auch wenn nach vielen vielen Belastungswechseln noch nichts festzustellen ist, wirken die täglich rund 12.000 Umdrehungen wie der sprichwörtliche stete Tropfen, der den Stein höhlt.
Als das Rad am fünften Tag geborgen wurde, hatten sich die meisten Schaufelblätter aus den Verankerungen gelöst, hingen lasch auf der Konstruktion und wickelten sich darum. Das Rad drehte sich kaum noch, nur wenn eine der zwei verbliebenen Schaufeln ins Wasser tauchte, ging ein Ruck durch das Wasserrad und es beschleunigte kurz seine Drehbewegung. So wurden nach der Bergung auch leichte Schäden am Mittelkörper festgestellt, an den Lagerpunkten der Druckstäbe. Diese sind jedoch eindeutig als Folgeschäden, verursacht durch die ruckartigen Bewegungen des havarierten Rades, einzustufen. Sie wären überdies durch eine leichte Verstärkung der Lagerpunkte bzw. die Verwendung zusätzlicher Beilagscheiben zu vermeiden gewesen.

Die Ressourcen des Projekts waren nun endgültig aufgebraucht. Wasserrad, Schaltkasten und alle weiteren Komponenten wurden demontiert, in ein Lager in Stainz in der Weststeiermark gebracht und das Projekt somit am 09.08.2012 eingestellt. Auch wenn das ursprüngliche Ziel eines Betriebs über drei Monate verfehlt wurde, konnten viele Erkenntnisse gewonnen werden, die eine wichtige Rolle bei einem ähnlichen Projekt spielen können. Ergebnisse, Probleme und Lösungen während des Projektverlaufs sowie Empfehlungen für zukünftige Entwicklungen sind in Kapitel 4 zusammengestellt.

3.4 Technische Daten

In Abbildung 32 sind die wichtigsten Daten der verschiedenen Versionen des luftgeformten Wasserrads in tabellarischer Form aufbereitet.

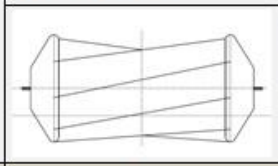
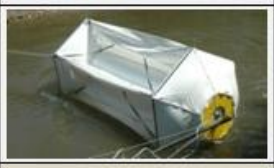
		Modell 1	Modell 2	Modell 3
				
Grund-daten	Breite	3 m	3 m	3 m
	Durchmesser	150 cm	133 - 152 cm (sechseckig)	158 cm
	Gewicht	110 kg	125 kg	170 kg
Schaufel-blätter	Anzahl	9	6	9
	Schaufelwinkel β_s	75°	90°	90°
	achsiale Verdrehung	40°	0°	20°
Getriebe	Übersetzungsstufen	2	2	3
	Übersetzungsverhältnis	1:10	1:10	1:21
Betriebs-daten	Drehbewegung	-	wellig	gleichmäßig
	Drehzahl	-	6 U/min	8 U/min
	Leerlaufspannung	-	6 - 8 V	30 V
	Leistung	-	2 - 5 W	50 W
	Gesamt-Wirkungsgrad	-	< 1,5 %	15 %

Abbildung 32: Technische Daten

Natürlich existieren zahlreiche weitere Daten, Berechnungen, Konstruktions- und Detailzeichnungen, Fotos, Schnittmuster, Messwerte etc., sie würden jedoch den Rahmen dieses Berichts sprengen. Für eine grundsätzliche Betrachtung und um einen guten Überblick zu gewinnen sollten die hier angegebenen Werte ausreichen.

4 Ergebnisse

Wie bei einem derart experimentellen Ansatz zu erwarten, traten im Projektverlauf verschiedenste Probleme und Pannen auf. Die meisten Schwierigkeiten konnten jedoch gelöst werden, und so steht trotz der vergleichsweise geringen Projektlaufzeit und der geringen Mittel eine umfangreiche Sammlung positiver Ergebnisse zur Verfügung, auf denen ein ähnliches Projekt aufbauen kann.

Bedauernd ist an dieser Stelle anzumerken, dass die ursprünglich für Modell 1 geplanten, rein luftgeformten Seitenaufbauten in der Praxis nicht erprobt werden konnten und somit keine Aussage über deren Eignung getroffen werden kann.

4.1 Probleme und Lösungen

Die im Betrieb des Wasserrads aufgetretenen Probleme lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen:

1. Schwierigkeiten in Zusammenhang mit Abnutzung und Materialermüdung durch die ständigen Lastwechsel an einer rotierenden Maschine, die wie ein Wasserrad nur einseitig belastet wird.

2. Geringer elektrischer Output.

Punkt 2 ließ sich vollständig beheben, indem das Übersetzungsverhältnis des Getriebes gesteigert und durch die höhere Schaufelanzahl und deren axialer Schrägstellung (Modell 3) für eine gleichmäßige Drehbewegung gesorgt wurde.

Zu den Abnutzungserscheinungen zählen die Zerstörung der Seitenaufbauten und Schwimmkörper bei Modell 2 sowie das Ablösen der Schaufelblätter bei Modell 3.
Der Einsatz stärkerer Materialien und solider Verschraubungen bei Modell 3 sorgte für die notwendige Festigkeit der Seitenaufbauten. Jede kleinste Bewegung zwischen den einzelnen festen Bauteilen muss vermieden werden, da dies sonst unweigerlich über kurz oder lang zu Beschädigungen führt. An den Seitenaufbauten von Modell 3 konnten keinerlei Ermüdungserscheinungen festgestellt werden.
Felgen und Mantel schützten die Schwimmkörper vor dem Aufscheuern. Dazu kommt, dass die Seitenaufbauten die Schwimmkörper nicht umschließen. Dies führt einerseits zu weniger Berührungsstellen zwischen luftgeformten und rigiden Teilen und andererseits dazu, dass beide nicht mit großer Kraft aneinandergepresst werden.
Anhand der sichtbaren Verletzungen an den Schwimmkörpern nach der Bergung von Modell 2 wird gefolgert, dass es sich nicht um ein Aufscheuern im Sinn einer reibenden Bewegung zwischen Holzgestell und Gummischlauch handelte. Es deutet alles darauf hin, dass sich die Positionen beider Materialien zueinander nicht veränderten. Der Gummischlauch war zwischen den hölzernen Baulatten eingekeilt und mit hohem Druck aufgepumpt (siehe Abbildung 23, im Betrieb waren die Schläuche noch wesentlich stärker aufgepumpt als auf der Abbildung zu sehen und beulten sich zwischen den Holzlatten deutlich aus). Der Schlauch kann sich so praktisch nicht bewegen. Während der Umdrehungen des Wasserrads passiert nun aber folgendes: Bei jedem Eintauchen ins Wasser wird der Schlauch ein wenig komprimiert. Da der Gummi elastisch ist, verursacht dies ein leichtes Zusammenziehen des Materials. So kommt es zu minimalen Bewegungen genau am Übergang von Pressstelle zu frei „geblähtem“ Schlauch, also am Rand der Holzlatten, die sich so im Verlauf unzähliger Drehungen durch den weichen Gummi graben.
Sorgt aber ein starker, nicht elastischer Mantel dafür, dass dieses Dehnen des Pneu-Materials über Wasser und das Zusammenziehen unter Wasser nicht stattfindet, werden

diese Scheuerstellen vermieden. Bei Modell 3 konnten nach dem Betrieb keine derartigen (und auch keine anderen) Verletzungen an den Schwimmkörpern festgestellt werden.

Das letztendlich zum Ende des Projekts führende Ablösen der Schaufelblätter bei Modell 3 dagegen war durch eine klassische Scheuerbewegung verursacht. Die Schaufelblätter waren durch Gurte und Seile an ihren vier Befestigungslaschen pro Seite mit den Lärchenholzlatten der Seitenaufbauten verschnürt und nur durch Muskelkraft festgezurrt. Wie sich zeigte, reicht dies nicht aus, um die Spannung so hoch zu halten, dass sich unter Belastung keine Bewegung an den Aufhängungsstellen ergibt. Um textile Schaufelblätter für den Dauereinsatz geeignet zu machen wird als nächster Entwicklungsschritt empfohlen, die Vorspannung der Schaufelblätter extrem hoch zu gestalten, sodass die zusätzliche Spannung im Belastungsfall (wenn das Schaufelblatt in die Strömung eintaucht) im Verhältnis dazu sehr klein ist. Grundsätzlich sollten an den Befestigungspunkten verschleißresistente Materialien wie Stahlösen und -seile zum Einsatz kommen.
Eventuell kann man bei der Gestaltung textiler Schaufelblätter Anleihen aus dem Yachtbau nehmen.

Ein weiteres Problem, das auftrat, ist das Umklappen der leicht trogförmig ausgeführten Schaufelblätter beim Auftauchen aus dem Wasser. Dies führt dazu, dass die Schaufelblätter Wasser in die Höhe fördern, was die Drehzahl verlangsamt und große Verluste verursacht.
Schon bei der Inbetriebnahme von Modell 2 konnte dieses Problem gelöst werden, indem Gurte durch die Mitte der Schaufelblätter gezogen wurden, die die Wölbung der Schaufelblätter aus Strömungsrichtung gesehen konkav hielten. Die Betriebsdauer von Modell 2 war zu kurz, um nennenswerte Abnutzungserscheinungen an diesen Verspannungen zu verursachen, doch während des Betriebs von Modell 3 zeigten sich leichte Beschädigungen, die annehmen lassen, dass bei einer derartige Anordnung für den Dauerbetrieb zumindest Stahlösen oder Ähnliches notwendig sind.
Besser scheint es aber, die Notwendigkeit solcher zusätzlicher Verspannungen gleich im Vorhinein zu vermeiden. Dies gelingt zum Beispiel mit einem entsprechenden Schaufelwinkel β_S, wie er für Modell 1 geplant war. Zusätzlich könnte man die Schaufelblätter als einfache plane Flächen gestalten. Dies führt jedoch zu einem niedereren Strömungswiderstand im Wasser (geringerer c_W-Wert) und damit einem geringeren Wirkungsgrad.

4.2 Erkenntnisse

Das Projekt hat gezeigt, dass es möglich ist, ein modernes leistungsfähiges Wasserrad in einem Fluss zu installieren, ohne in seinen natürlichen Verlauf durch bauliche Maßnahmen einzugreifen; ein Wasserrad, das nichts weiter als zwei Seile zur Verankerung am Ufer benötigt. Die Konstruktion in Leichtbauweise unter Verwendung luftgeformter und textiler Komponenten besitzt Potenzial. Aus dem Zusammenspiel von Kunst und Technik ist ein

vielversprechendes Konzept entstanden und viele praktische Erfahrungen konnten gesammelt werden.
Auf der anderen Seite gehört zu den elementaren Ergebnissen aus dem Projekt - im Nachhinein vielleicht wenig überraschend - die Erkenntnis, wie zermürbend die andauernde Kraft fließenden Wassers auf Materialien und Maschinen wirkt.

Mit 15% erreichte das Wasserrad einen Gesamtwirkungsgrad, der erfreulich nahe an dem auf Basis der Berechnungen maximal möglichen Wirkungsgrad von 20% liegt (siehe Kapitel 2.1). Der berechnete Wirkungsgrad bezieht sich dabei lediglich auf die Umwandlung der Strömungsenergie in Drehbewegung am Wasserrad, während der gemessene bereits alle Verluste in Getriebe, Generator und Übertragungsleitung bis zum Schaltkasten beinhaltet. Getriebe und Generator besitzen also hervorragende Eigenschaften. Die Integration der gesamten Getriebe-Generator-Einheit in das sich drehende Rad hat sich als optimale Konstruktionsweise für ein derartiges schwimmendes Wasserrad erwiesen.
Die elektrische Leistung von 50 Watt mag nicht besonders hoch anmuten, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von nur einem Meter pro Sekunde ist jedoch rein aufgrund der physikalischen Gegebenheiten mit einem Widerstandsläufer kaum mehr herauszuholen. Für zukünftige Entwicklungen wird daher empfohlen, nach Möglichkeit einen Standort mit höherer Strömungsgeschwindigkeit zu wählen. Bei einer einfachen Verdopplung der Wassergeschwindigkeit kann potenziell die achtfache Leistung gewonnen werden. Außerdem steigt damit die Drehzahl des Wasserrads. Das Getriebe kann einfacher ausfallen und braucht ein geringeres Übersetzungsverhältnis.

Wie sich zeigte, müssen die mechanisch belasteten festen Komponenten und Bauteile ausreichend stark ausgelegt werden, um der andauernden wechselnden Belastung standzuhalten.
Luftgeformte Teile, insbesondere wenn sie ins Wasser eintauchen und damit ständig wechselnden Spannungszuständen in der Membran ausgesetzt sind, müssen gut geschützt sein. Sie sollten unter hohem Druck aufgeblasen sein und dürfen nicht aus elastischen Materialien bestehen, um Verletzungen wie in Kapitel 4.1 geschildert zu vermeiden. Außerdem sollten sie nicht zwischen starren Teilen der Konstruktion eingezwängt sein.
Nicht zu unterschätzen sind die großen Wechsel des Drucks in den Pneus, die durch meteorologische Temperaturschwankungen verursacht werden. Bei hohen Außentemperaturen besteht Gefahr, dass die Pneus platzen, bei tiefen, dass ihr Innendruck nicht mehr ausreicht, um die Konstruktion zu stützen oder zu tragen, und dass sie beginnen, sich unter Wasser zu stark zu verformen, was an Berührungspunkten zu starren Bauteilen wiederum zu Beschädigungen führen kann.

Das einzige Problem, das nicht mehr im Rahmen des Projekts gelöst werden konnte, ist die Befestigung der Schaufelblätter. Lösungsvorschläge wurden bereits in Kapitel 4.1 diskutiert. Es kann nicht nur nicht ausgeschlossen werden, sondern es ist sogar recht wahrscheinlich,

dass das Problem der Schaufelaufhängungen nicht die letzte Herausforderung auf dem Weg zu einem luftgeformten Wasserrad ist, das den Anforderungen eines wochen-, monate- oder gar jahrelangen Betriebs gewachsen ist. Die Entwicklung einer derartigen Maschine ist eben nicht „nur“ ein Kunstprojekt, sondern erfordert ernsthafte technische Entwicklungsarbeit, die sich über den kontinuierlichen Prozess von Versuch und Irrtum an die optimale Lösung herantastet. - Auch dies ist eine wichtige Erkenntnis aus dem Projekt.
In diesem Kontext muss auch kritisch hinterfragt werden, ob die Zielvorstellungen für ein Projekt von eher kleinem Umfang und Budget, wie es das vorliegende war, nicht von Anfang an etwas zu ambitioniert waren. Dies betrifft die angestrebte elektrische Leistungsfähigkeit genauso wie die vorgesehene Einsatzdauer und die experimentelle Konstruktionsweise. Kommt man zu dem Entschluss, diese Frage zu bejahen, so wird man die Ursache dafür vermutlich in der mangelnden Erfahrung der Projektverantwortlichen zu suchen haben. Doch genau darum geht es ja in der experimentellen Forschung und Entwicklung: Wird wie hier absolutes Neuland betreten, kann man kaum auf Erfahrungswerten aufbauen, denn sie müssen erst geschaffen werden. Im Nachhinein ist man immer schlauer - und genau das ist das Ziel.

Bei all den sich zeigenden Herausforderungen, insbesondere die luftgeformten Teile betreffend, muss es als großer Erfolg gewertet werden, dass der sehr experimentell konzipierte Mittelkörper des Wasserrads sich über die gesamte Einsatzdauer hervorragend bewährt hat. Bei statischen Anwendungen, sogar im Brückenbau, sind Kombinationen aus dünnen Druckstäben und stabilisierenden Pneus bereits zur Anwendung gekommen, nach unserem Wissensstand jedoch noch nie bei rotierenden Maschinen. Den Belastungstest als zentrale Verbindungsstelle des ganzen Wasserrads hat der Mittelkörper einwandfrei bestanden. Eventuell sollte man nur die Lagerpunkte der Druckstäbe etwas fester auslegen, damit es auch beim Versagen anderer Teile nicht zu Folgeschäden kommen kann.
Trotz seiner Größe und Belastungsfähigkeit besitzt der Mittelkörper kaum eigene Masse, im zusammengelegten Zustand braucht er kaum Platz. Er ist damit maßgeblich dafür verantwortlich, dass sich das Wasserrad trotz der letztendlich recht massiv ausgefallenen Seitenteile noch sehr gut transportieren ließ.
Mit diesen Eigenschaften sind nach diesem Prinzip gefertigte Bauteile nicht nur für Wasserräder, sondern für alle möglichen Anwendungen mit Sicherheit höchst interessant.

Ganz unabhängig von den verwendeten Materialien hat sich das Konzept, Wasserrad, Generator und Schwimmkörper als eine geschlossene Einheit auszuführen, als sehr vielversprechend erwiesen. Andere Wasserräder könnten diese Bauweise übernehmen. Ob sie nun aus pneumatischen Teilen bestehen oder nicht, spielt dabei keine Rolle. Auch Flussräder aus rein rigiden Strukturen könnten von dieser integrierten Bauweise profitieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb weniger Monate ist es gelungen, eine Grundidee über den gesamten Prozess von Konzeptentwurf, Berechnung, Planung, Fertigung und Betrieb bis hin zur Durchführung von Optimierungsschritten zu führen.
Zahlreiche Schwierigkeiten sind aufgetreten, die so zunächst nicht erwartet wurden. Dabei wurde über die verschiedenen Entwicklungsschritte aber auch gezeigt, dass sich die aufgetretenen Probleme durch genaue Problemanalyse, kreative Planung und Überarbeitung einzelner Teile durchaus lösen lassen. Im Rahmen des Projekts konnten nicht alle technischen Probleme gelöst werden. Es sind aber auch keine Anzeichen dafür aufgetaucht, dass ein luftgeformtes Wasserrad generell nicht praxistauglich ist. Mit dem notwendigen Einsatz und Lernprozess scheint es durchaus im Bereich des Möglichen, das luftgeformte Wasserrad für den Dauerbetrieb tauglich zu machen. Hierfür ist weitere Entwicklungsarbeit erforderlich.

Nicht alle Ziele des Projekts wurden erreicht. Es ist bedauerlich, dass das Wasserrad trotz allen Einsatzes und aller Verbesserungen nicht wie geplant bis in den Oktober hinein betrieben werden konnte. Mit so einem Ausgang muss man aber rechnen, wenn man sich so weit in den Bereich des Experimentellen hineinwagt. Der wahre Umfang eines solchen Projekts zeigt sich da nicht selten erst im Nachhinein.

Unter Beweis gestellt wurden jedenfalls die allgemeine Funktionstauglichkeit und die elektrische Leistungsfähigkeit des Konzepts eines schwimmenden, alle Komponenten zur Energieerzeugung integrierenden Wasserrads.
Ein solches Wasserrad besitzt das Potential, Wasserkraft minimalinvasiv und in hohem Maße ökologisch zu nutzen. Zahlreiche Standorte kommen dafür in Frage, wo die Energie heute im wahrsten Sinn des Wortes ungenutzt den Bach hinunter geht.

Für die Zukunft wäre es wünschenswert, zunächst einmal ein allgemeines Modell zur Berechnung und Auslegung von Flussrädern zu entwickeln, da ein solches unserem Wissen nach noch nicht existiert. Ein strömungstechnisch optimiertes Flussrad sollte in der Lage sein, einen deutlich größeren Anteil der kinetischen Energie des Wassers in elektrische Leistung umzusetzen, als es ein reiner Widerstandsläufer ist.

Alles in allem liegen durch die Durchführung des Projekts zahlreiche positive Erkenntnisse vor, die bei der weiteren Entwicklung von luftgeformten Wasserrädern, aber auch von Flussrädern und pneumatischen Strukturen im Allgemeinen wertvoll sein können.

Literatur- und Quellenverzeichnis

[ELBS10] Abbildung aus dem Online-Lexikon WIKIPEDIA, *http://commons.wikimedia.org/wiki/File:2010-07-05_Prototyp_einer_Schiffm%C3%BChle_mit_Generator_in_Magdeburg.jpg*, abgerufen am 17.03.2013

[GREG59] F. GREGOROVIUS, *Geschichte der Stadt Rom im Mittelalter*, Bd. I, Cotta, Stuttgart 1859

[HEBG13] Homepage von Mike Lowery, *http://www.hydro-electric-barrel.com/html/news.html*, abgerufen am 17.03.2013

[NTFS13] Technologiekompetenz Fluss-Strom, *http://www.flussstrom.de/*, abgerufen am 17.03.2013

[NUER05] D. NUERNBERG, *Wasserräder mit Kropfgerinne*, Schäfer Verlag, Detmold 2005

[SPIE11] M. SPIEWACK, *Erfahrungsbericht aus dem NEMO-Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom*, pdf-Datei, Magdeburg 2011

[TENS07] R. LUCHSINGER, *Tensairity®: tragend, luftig & leicht*, pdf-Datei, Center for Synergetic Structures 2007

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell aus PMMA (Isabella Pessl) ... 6
Abbildung 2: Modell aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe (P.Michael Schultes) ... 7
Abbildung 3: Mannsgroßer Prototy ... 7
Abbildung 4: Projektteam ... 9
Abbildung 5: Elb-Strom 1 [ELBS10] ... 11
Abbildung 6: Energy-Floater [SPIE11] ... 11
Abbildung 7: HEB generator ... 11
Abbildung 8: Leistungskennlinie bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1m/s ... 15
Abbildung 9: Standort mit eingezeichnetem Trägerseil ... 17
Abbildung 10: Erste Skizze ... 18
Abbildung 11: 3D-Modell ... 19
Abbildung 12: Finaler Entwurf des luftgeformten Wasserrades ... 20
Abbildung 13: Linke Box (leer) ... 22
Abbildung 14: Generatorbox mit Getriebe ... 22
Abbildung 15: Getriebe-Generator-Einheit ... 23
Abbildung 16: Mittelkörper während des Zusammenbaus ... 24
Abbildung 17: Mittelkörper fertig montiert und aufgeblasen ... 24
Abbildung 18: Die luftgeformten Seitenaufbauten ... 25
Abbildung 19: Anordnung der textilen Schaufelblätter ... 26
Abbildung 20: textiles Schaufelblatt ... 27
Abbildung 21: Schaltkasten mit Laterne, Bildschirm und Steckdose ... 28
Abbildung 22: Zeittafel zum Projektverlauf von März bis August 2012 ... 29
Abbildung 23: neue Seitenaufbauten ... 31
Abbildung 24: Modell 2 in Betrieb ... 32
Abbildung 25: 3-stufiges Kettengetriebe ... 34
Abbildung 26: Seitenaufbauten Modell 3 ... 35
Abbildung 27: Montage Seitenaufbauten ... 36
Abbildung 28: Detail Verschraubung ... 36
Abbildung 29: Montage Felgen ... 36
Abbildung 30: Schwimmkörper und Schaufelblätter ... 36
Abbildung 31: Modell 3 in Betrieb ... 37
Abbildung 32: Technische Daten ... 39