

# Stromerzeugung an Regenfallrohren

Hendrik Berhalter, Markus Kregel, Xinchu Yu

# VDE Technikpreis 2009



*Dokumentation*

Goethe-Gymnasium Dortmund  
Stettiner Straße 12  
44263 Dortmund

Betreuungslehrer: Dieter Lindenberg

# Inhalt

Inhalt.....	2
Projektkurzbeschreibung .....	3
Einleitung.....	4
Projektverlauf.....	4
Ermitteln der optimalen Turbinenform.....	4
Theoretische Vorüberlegungen.....	4
Praktische Untersuchung der Kaplan-Turbine.....	5
Überlegungen zur Pelton-Turbine .....	6
Bau der Pelton-Turbine I.....	6
Test des bisherigen Aufbaus.....	7
Bau der Pelton-Turbine II.....	7
Nutzung der elektrischen Energie .....	8
Messungen und Auswertungen mit dem PC .....	9
Einbau der Anlage in die Dachentwässerung.....	10
Fokussiereinrichtung für das Wasser.....	11
Ergebnisse .....	12
Das fertige Produkt (Zusammenfassung) .....	12
Versuchsergebnisse und Messreihen .....	12
Anwendungsbezug.....	14
Kritische Reflexion und Beurteilung der Ergebnisse.....	15
Nachwort.....	16
Danksagung.....	16
Angaben über die Projektgruppe .....	16
Anhang.....	17
Schaltplan:.....	18
Projektverlauf in Bildern: .....	19
Pressemitteilung .....	23

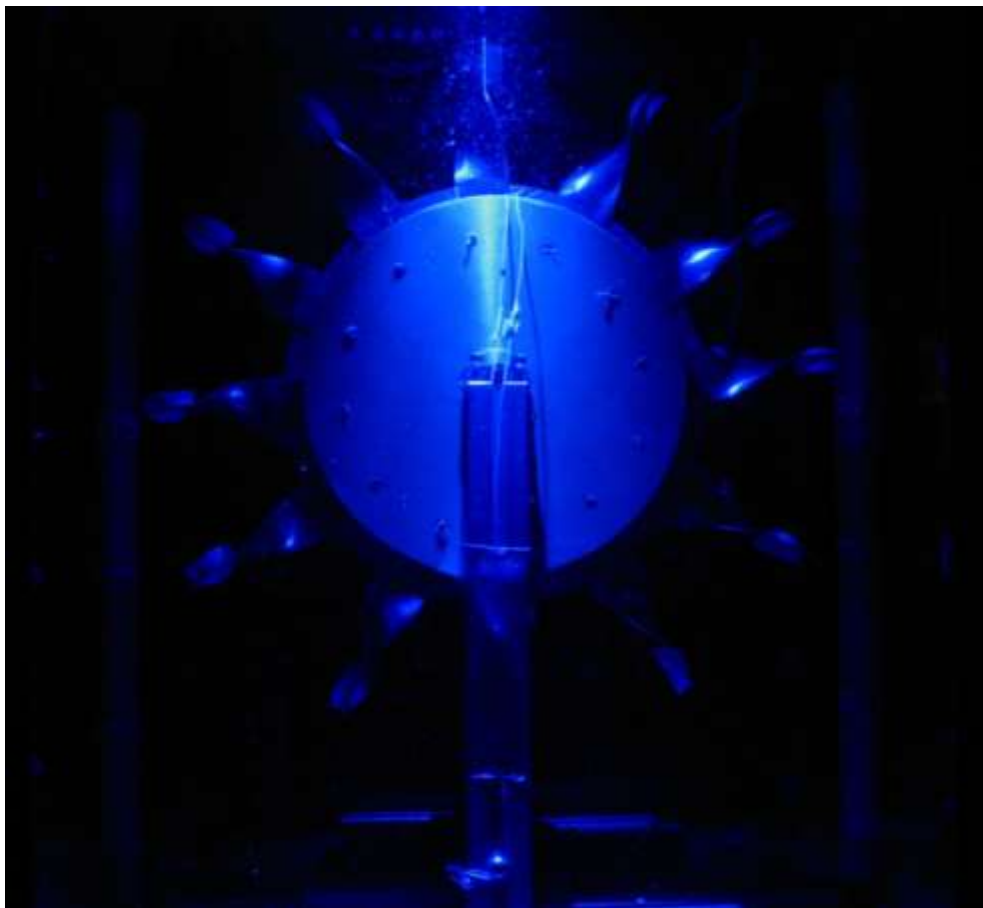
## Projektkurzbeschreibung

In unserem Projekt haben wir eine Anlage entwickelt, mit der man in Regenfallrohren elektrische Energie erzeugen kann. Dabei haben wir zunächst die optimale Turbinenform ermittelt und in der Hauptprojektphase einen Prototypen gebaut. Diesen Prototypen haben wir durch verschiedene Modifikationen verbessert und die Einsatzmöglichkeiten erweitert.

So haben wir es geschafft, dass die Anlage bereits bei sehr geringen Regenmengen elektrische Energie erzeugt. Diese Energie kann sowohl direkt genutzt, als auch gespeichert und bei Bedarf wieder abgerufen werden.

Außerdem haben wir für den Zeitraum der Testphase ein Programm entwickelt, welches uns bei der Auswertung der Messreihen und dem Sammeln von Daten unterstützt. Dadurch waren wir in der Lage genaue Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Anlage zu treffen.

**Generator bei Nacht. Die Beleuchtung in Form von zwei superhellen LEDs wurde mit Hilfe der zuvor durch Wasserkraft erzeugten Energie realisiert.**



## Einleitung

Seit einigen Jahren erzeugen die Hausnummernschild- und Gartenwegbeleuchtungen ihren Strom selbstständig mit Hilfe kleiner Solarzellen. Wir haben nach bisher ungenutzten Möglichkeiten gesucht, im privaten Bereich umweltfreundlich Strom für kleine Verbraucher zu erzeugen, um die oben genannten Anwendungen zusätzlich mit Energie zu versorgen. Die innovativste Idee war für uns, die Energie des Regenwassers zu nutzen.

Da das Regenwasser im Allgemeinen auf einer großen Fläche verteilt ist, bietet sich das Hausdach als große Sammelfläche mit Abflussmöglichkeiten in Form von Regenfallrohren an. Bei Regen fließt durch diese Fallrohre eine große Menge an Wasser, das durch den Fall von der Dachkante bis zum Boden an Geschwindigkeit gewinnt.

In Bodennähe, an der das Wasser am schnellsten ist, setzt unser Projekt an: In unserem Projekt geht es darum, eine Anlage zu entwickeln, welche die Geschwindigkeit und die damit verbundene Energie des Wassers zur Stromerzeugung nutzt. Dabei soll die erzeugte Energie – wann immer es regnet – gespeichert werden und auf Abruf bereit stehen, damit beispielsweise die Hausnummernbeleuchtung bei Dunkelheit eingeschaltet werden kann. Eine solche Schaltung soll während der Projektphase ebenfalls realisiert werden.

Für die Testphase des gebauten Prototyps soll eine computergestützte Messung und Auswertung verschiedener Versuchsreihen durchgeführt werden.

## Projektverlauf

### Ermitteln der optimalen Turbinenform

Für unsere Anlage kommen zwei mögliche Turbinenformen in Frage, dies ist zum einen die Kaplan-Turbine und zum anderen die Pelton-Turbine. Bei einer Kaplan-Turbine ist die Rotationsachse parallel zur Fallrichtung des Wassers, die Form des Rotors entspricht etwa der Form eines (PC-)Lüfters. Bei der Pelton-Turbine ist die Rotationsachse senkrecht zur Fallrichtung des Wassers, die Pelton-Turbine kann man auch als Schaufelrad bezeichnen.

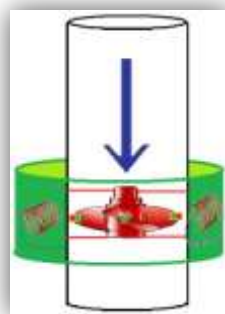


Abb. 2: Kaplan-Turbine

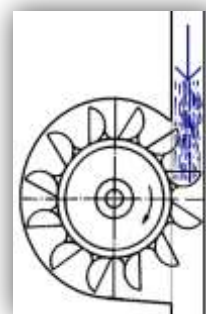


Abb. 1: Pelton-Turbine

### Theoretische Vorüberlegungen

Um möglichst realistische Werte für die Durchflussmengen in Regenfallrohren bei realem Regen zu bekommen, haben wir folgende Modellierung durchgeführt:

## Definition Regentag<sup>1</sup>

„Bereits ab einer 24-stündigen Regenmenge von nur 0,1 Liter pro Quadratmeter [ $0,0001\text{m}^3/\text{m}^2=0,0001\text{m}=0,1\text{ mm}$ ], die in der Regel zum Frühtermin eines Tages gemeldet wird, spricht man in der Meteorologie von einem Regentag.

Der Begriff "Regentag" ist also in der Tat sehr scharf definiert und entspricht keineswegs immer der naheliegenden, naiven Vorstellung von einem wolkenreichen, regnerischen Tag. So ist zum Beispiel auch ein sonniger und trockener Tag, an dem es nur in den Nachtstunden einen kurzen Schauer gab, vielfach bereits ein Regentag, sofern er die geforderte Mindestniederschlagsmenge erbracht hat.“

Statistisch gesehen gibt es in Dortmund 185 Regentage im Jahr<sup>2</sup> und der durchschnittliche Jahresniederschlag im Ruhrgebiet beträgt 800 mm. Daraus ergeben sich 4,3 mm Niederschlag pro Regentag. Da es keine Angaben über die durchschnittliche Dauer der Niederschläge innerhalb eines Regentages gibt, haben wir geschätzt, dass die Regenmenge innerhalb von einer Stunde fällt.

Bei einer Dachfläche von  $50\text{m}^2$  folgt eine Wassermenge von

$$V = 50\text{ m}^2 * 0,0043\text{ m} = 0,215\text{ m}^3 = 215\text{ l}$$

Die Durchflussgeschwindigkeit bei „Durchschnittsregen“ beträgt also  $215\text{ l}/60\text{ min} = 3,58\text{ l}/\text{min}$ .

Da ein Tag mit 0,1 mm Niederschlag bereits als Regentag gilt, diese Menge jedoch nicht einmal ausreicht, um bis in die Regenrinne zu fließen, müssen wir für unsere Modellierung andere Normen als den reinen statistischen Durchschnittswert finden.

Daher definieren wir folgende Normen (für  $50\text{ m}^2$  Dachfläche):

- Normaler Regen: **4,5 l/ min**
- Gewitterregen (gemäßigte Klimazone) : **10 -20 l/min**
- Starkregen (etwa 2 mal pro Jahr, kurze Dauer): **bis zu 50 l/min**

## Praktische Untersuchung der Kaplan-Turbine

Die Kaplan-Turbine erscheint zunächst am geeignetsten, da sie besonders platzsparend ist und nahezu vollständig in das Fallrohr integriert werden kann (siehe Konzept).



Abb. 3: Axiallüfter am Fallrohr

Um die Eignung dieser Turbinenform zu testen haben wir eine Versuchsreihe mit einem Axiallüfter (3412 NHH-397 von ebm-papst) als provisorische Kaplan-Turbine durchgeführt. Dazu haben wir den Lüfter unter einem Regenfallrohr befestigt und bei unterschiedlichen Wassermengen beobachtet.

### Qualitative Ergebnisse:

Da das Wasser überwiegend unkontrolliert am Rand des Rohres fließt und nicht im richtigen Winkel auf den Rotor trifft, dreht er sich fast gar nicht, höchstens unregelmäßig und ruckartig. Erst wenn man eine deutlich größere Wassermenge verwendet, erfolgt eine kontinuierliche Drehung des Lüfters, wobei jedoch ein Großteil des Wassers ungenutzt bleibt.

<sup>1</sup> <http://www.top-wetter.de/lexikon/r/regentag.htm>

<sup>2</sup> <http://nachrichten.t-online.de/c/16/29/52/74/16295274,pt=self,si=6,topic=12347296.html>

### Quantitative Ergebnisse mit „normalem Regen“ (4,5l/min):

Der Rotor dreht sich überhaupt nicht. Die Wassermenge reicht nicht aus, um den Rotor in eine kontinuierliche Drehbewegung zu versetzen. Da uns das Ergebnis nicht zufrieden gestellt hat, haben wir ein „Wasserleitsystem“, bestehend aus Trichter und Schlauch, entworfen, um das Wasser gezielt auf die Rotorblätter zu lenken. Dennoch hat die Wassermenge nicht ausgereicht.

### Überlegungen zur Pelton-Turbine

Eine Pelton-Turbine funktioniert unabhängig vom Wasserdruck und ist insbesondere auch für unterschiedliche Wassermengen gleich gut geeignet. Da sich die Kaplan-Turbine (zumindest mit der verwendeten Luftschaufel eines Lüfterrades) als ungeeignet herausgestellt hat, und uns die Möglichkeiten fehlten eine speziell für die Aufgabenstellung (Wassermenge, Zulauf- und Strömungsrichtung) ausgelegte Kaplan-Turbine herzustellen, haben wir uns entschieden eine Pelton-Turbine zu bauen, die mit ihren Abmessungen auf die Anwendung an Regenfallrohren und dabei die auftretenden Wassermengen abgestimmt ist.

### Bau der Pelton-Turbine I

Die Pelton-Turbine ist umso effizienter, je größer der Hebelarm der Schaufeln ist. Die Anlage muss in ihrer Dimension an die Anwendung angepasst werden und ist daher in ihrer maximalen Größe eingeschränkt. Daher haben wir uns entschieden eine Turbine zu bauen, deren Durchmesser inklusive Schaufeln 50 cm beträgt. Das ist ein Kompromiss zwischen Effizienz und Dimension, der sowohl einen ausreichenden Hebelarm als auch eine nicht zu große Gesamtanlage garantiert.

Zunächst haben wir uns dem Bau der Schaufeln und deren Halterung gewidmet. Die Halterung haben wir aus Aluminiumblech (2mm stark) gefertigt. Dazu haben wir zwölf Aluminiumstreifen à 150 mm x 40 mm zugeschnitten und um 90° verdreht. Anschließend haben wir Löcher (30 mm Durchmesser) gebohrt, in die wir halbierte Tischtennisbälle als Schaufeln eingeklebt haben.

Die Halterungen für die Schaufeln wurden durch eine Aluminiumscheibe auf der Drehachse befestigt. Das Material Aluminium haben wir gewählt, weil es leicht und stabil, sowie rostfrei und nicht magnetisch ist.



Abb. 4: Pelton-Turbine (Rohbau)

Die Aluminiumscheibe wurde aus einem Zylinder mit 400 mm Durchmesser und 40 mm Höhe gedreht. Dabei haben wir in der Mitte eine Krempe (100 mm Außendurchmesser) stehen lassen. Wir haben in der Mitte ein 30 mm breites Loch gebohrt und dann von einer Seite das Loch auf 42 mm aufgedreht. An der Rückseite haben wir ein Bund von 2 mm stehen gelassen, so dass sich ein Lagersitz mit Presspassung ergibt. Dadurch konnten wir ein 42 mm großes Kugellager in der Mitte einpressen. Außerhalb des Lagersitzes wurde die Aluminiumscheibe von Außen bis auf einen Durchmesser von 100 mm auf 3,5 mm Stärke und der Gesamtdurchmesser auf 300 mm abgedreht. Auf die so entstandene Aluminiumscheibe haben wir die Halterungen für die Schaufeln geschraubt. Die gesamte

Scheibe haben wir dann mithilfe einer abgesetzten Welle mit Gewindeende und einer Mutter (M 14) befestigt und diese dann auf ein zuvor zusammengesetztes Aluminiumgestell montiert.

## Test des bisherigen Aufbaus

Wir haben den Aufbau unter ein Regenrohr gestellt und Wasser in die Dachrinne gegossen. Dabei haben wir festgestellt, dass sich das Rad sehr leicht (auch bei geringen Wassermengen) dreht. Eine Fokussierung des Wassers ist nicht zwingend erforderlich, da auch so genug Wasser auf die Schaufeln trifft.

## Bau der Pelton-Turbine II

Die Erzeugung von elektrischer Energie funktioniert folgendermaßen: Auf der Aluminiumscheibe befinden sich auf jeder Seite zwölf Magnete, die bei Rotation der Scheibe für ein magnetisches Wechselfeld sorgen. Auf beiden Seiten der Aluminiumscheibe befinden sich in geringem Abstand zwei fest auf der Achse montierte Kunststoffscheiben, die je zwölf Spulen tragen. Durch das magnetische Wechselfeld wird in diesen Spulen eine Wechselspannung induziert. Dabei verzichten wir bewusst auf Eisenkerne in den Spulen, um später Rastmomente zu vermeiden und ein Funktionieren der Anlage auch schon bei geringen Regenmengen zu garantieren.



**Abb. 5: Pelton-Turbine: Magnete auf der rotierenden Alu-Scheibe, Spulen in fest montierten grünen Kunststoffscheiben**

Die Kunststoffscheiben haben wir auf 260 mm Durchmesser gedreht, dann auf der später der Aluminiumscheibe zugewandten Seite eingesenkt und nur außen 5 mm Rand stehen gelassen. Als Träger für jede einzelne Spule haben wir Seilrollen aus Kunststoff gekauft und diese mithilfe von Drehbank und Bohrer leicht angepasst. Kunststoff haben wir sowohl für die Scheiben als auch für die Träger verwendet, da Kunststoff elektrisch nicht leitfähig ist und daher keine störenden Wirbelströme auftreten können. Ebenso war Holz als Werkstoff ungeeignet, da Holz bei Feuchtigkeit aufquillt (im Gegensatz zu Kunststoff) und eventuell reißen kann. Auf jeden Träger haben wir aus 0,33mm starkem Backlackdraht 350 Windungen gewickelt. Die so entstandenen 24 Spulen haben wir auf die beiden Plastikscheiben geschraubt und dann jeweils die zwölf Spulen einer Scheibe in Reihenschaltung miteinander verbunden. Um die Spulen und ihre Verdrahtung sicher vor äußeren Einflüssen wie Erschütterungen und Wasser zu schützen und eine glatte Oberfläche zu schaffen, haben wir die beiden Scheiben bis zur Oberkante der Spulen mit Epoxidharz ausgegossen.

Auf die Aluminiumscheibe haben wir NdFeB-Magnete (N40, 30 mm Durchmesser, 18 mm Höhe) angebracht. Da sich je zwölf Magnete auf beiden Seiten genau gegenüber sitzen, halten sie aufgrund ihrer eigenen, extrem starken magnetischen Kräfte und müssen nicht anderweitig befestigt werden.

## Nutzung der elektrischen Energie

Die Magnete bewegen sich bei Drehung des Rotors in ungefähr 2 mm Abstand an den Spulen vorbei. Jede Scheibe stellt während der Drehung eine eigene Wechselspannungsquelle dar.

Um LEDs oder andere elektrische Bauteile betreiben zu können, benötigen wir jedoch eine Gleichspannung. Daher haben wir die Wechselspannung jeder Scheibe jeweils mit Hilfe eines selbst gelöteten Brückengleichrichters zunächst gleichgerichtet, anschließend jeweils mit Hilfe eines Elektrolytkondensators mit einer Kapazität von  $100\mu\text{F}$  geglättet und parallel geschaltet (siehe Abb. 6: Schaltplan). Weil es bei den beiden Wechselspannungsquellen zu Phasenverschiebungen kommen kann, haben wir zunächst jede Spannungsquelle gleichgerichtet und erst anschließend parallel geschaltet. Die Parallelschaltung haben wir gewählt, um eine höhere Stromstärke zu erhalten. Zunächst wurde die Wechselspannung nicht hinreichend geglättet, dies führte zu Spannungsschwankungen und einem unerwünschten Blinken der angeschlossenen Leuchtdioden. Daher haben wir den Kondensator durch einen größeren mit einer Kapazität von  $6400\mu\text{F}$ , den wir aus einem alten Modelleisenbahnsteuergerät ausgebaut haben, ersetzt. Diese Vergrößerung der Kondensatorkapazität bewirkte eine zufriedenstellende Glättung der pulsierenden Gleichspannung und ein konstantes Leuchten der LEDs.

Danach haben wir uns der angestrebten Speicherung der elektrischen Energie gewidmet. Für die Speicherung wollten wir zunächst einen Kondensator verwenden. Dies war mit dem Problem verbunden, dass der Kondensator immer mit einer gleichen oder höheren Spannung geladen werden muss, als der augenblickliche Ladezustand. Wurde der Kondensator beispielsweise bereits mit  $5\text{V}$  geladen und die Anlage liefert bei langsamer Drehung nur  $3\text{V}$ , so wird der Kondensator nicht weiter geladen und die Energie bleibt ungenutzt.

Aus diesem Grund verwenden wir statt eines Kondensators sieben NiMH-Akkumulator-Zellen mit geringer Ladekapazität und  $1,2\text{V}$  Ladespannung pro Zelle.

Wenn wir die Akkus in Reihenschaltung laden, brauchen wir ziemlich genau  $7 \times 1,2\text{V} = 8,4\text{V}$  Ladespannung. Hierbei ergibt sich das gleiche Problem, wie beim Laden eines Kondensators: Bei geringer Umdrehungszahl wird der Schwellenwert von  $8,4\text{V}$  nicht erreicht und es kommt zu keiner Ladung, es fließt auch kein Strom.

Eine andere Möglichkeit (bei identischen Akkus) ist, die Akkus parallel zu laden. Dabei wird eine Ladespannung von nur  $1,2\text{V}$  benötigt. Diese kann schon mit einer weitaus geringeren Drehzahl realisiert werden. Sobald die Schwelle von  $1,2\text{V}$  erreicht ist, fließt ein Ladestrom, der dazu führt, dass die Spannung soweit abfällt und nicht wesentlich („kritisch“) über  $1,2\text{V}$  kommt. Spannungsspitzen werden auch schon durch die Kondensatoren abgefangen. Somit besteht kein Risiko, dass die Akkus durch zu große Spannung beschädigt werden. Weiterhin führt der Ladestrom zu Bremseffekten an der Turbine, da der Strom laut der Lenz'schen Regel seiner Ursache – also der Drehbewegung – entgegenwirkt.

Wir schalten die Akkumulatoren zum Laden also parallel, um auch kleine Spannungen (also Umdrehungen) nutzen zu können. Dabei wird eine Aufladung der Kondensatoren durch die Akkus mithilfe von Schottky-Dioden (geringer Spannungsabfall) verhindert. Ladung kann demnach nur von den Kondensatoren auf die Akkus und nicht umgekehrt fließen.

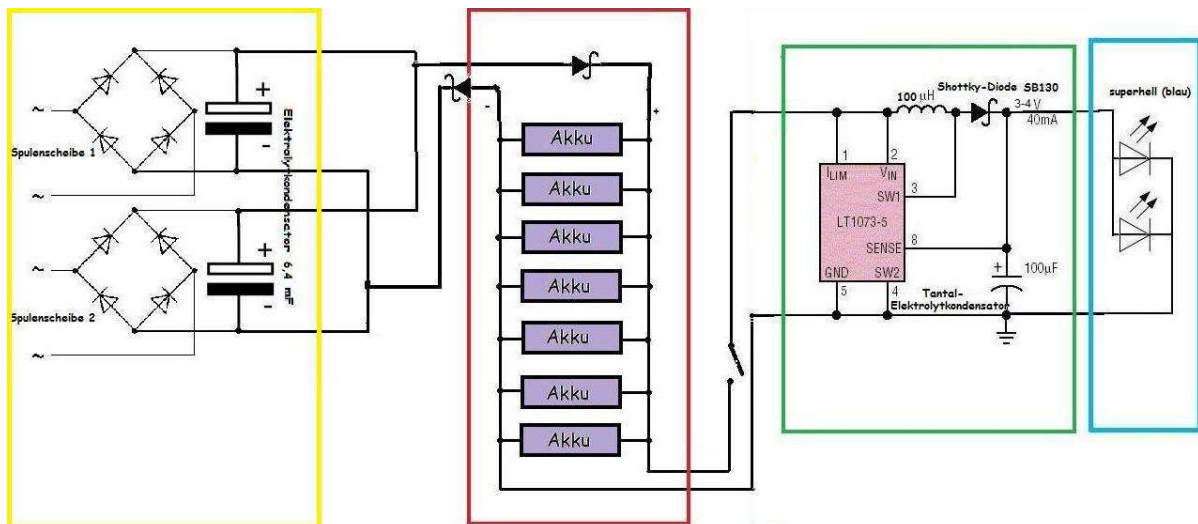


Abb. 6: Schaltplan (Vergrößerte Version siehe Anhang): Brückengleichrichter (gelb), Akkuzellen (rot), Step-Up-Converter (grün), superhelle LEDs (blau)

Wir wollten nun mit Hilfe der Akkus LEDs zum Leuchten bringen, die eine ausreichende Helligkeit für den Anwendungsbezug im Garten erbringen. Dabei tauchte ein neues Problem auf:

Zum Betreiben von superhellen LEDs benötigt man mindestens 3V, dies bedeutet, dass wir die Akkumulatoren in Reihe schalten müssten, um eine höhere Gesamtspannung zu erhalten. Wie bereits beschrieben, können wir die Akkus jedoch nicht in Reihenschaltung laden. Um dieses Problem zu lösen, müssten wir die Akkumulatoren in Parallelschaltung laden und den Strom gleichzeitig in Reihenschaltung entnehmen. Eine gleichzeitige Parallel- und Reihenschaltung ist jedoch unmöglich.

Wenn wir die Akkus parallel schalten wollen, was wie bereits erläutert für das Laden die einzig sinnvolle Methode ist, müssen wir aus den 1,2V, die wir an den Akkus abgreifen können, mindestens 3V machen.

Dazu haben wir eine Step-Up-Schaltung (Step-Up-Converter) gebaut (siehe Abb. 6 oder Anhang: Schaltplan). Diese besteht neben dem eigentlichen Step-Up-Converter (LT1073-5) aus einer Induktivität von 100μH, einer Shottky-Diode und einem Tantal-Elektrolytkondensator (für kurze Schaltzeiten) mit 100μF. Die Schwierigkeit bestand hierbei darin, die entsprechenden Bauteile zu beschaffen.

Die Step-Up-Schaltung hat eine Ausgangsspannung von 3-4 V (je nach Eingangsspannung) und einen maximalen Ausgangsstrom von 40 mA. Eine superhelle blaue LED benötigt 20 mA. Somit kann man auch ohne Vorwiderstand zwei LEDs parallel schalten, da der Strom ja bereits auf 40 mA begrenzt ist. Da die beiden LEDs vom selben Typ sind und damit nahezu baugleich, teilen sie sich den Strom relativ gleich und jede hat somit 20 mA.

## Messungen und Auswertungen mit dem PC

Zur Unterstützung unserer Versuche haben wir ein Programm entwickelt (mit Delphi), welches mithilfe eines Fischertechnik-Interfaces (über USB) Daten ermittelt und aufbereitet.

Während des Betriebs kann das Programm drei unterschiedliche Messreihen erfassen: Die momentane Umdrehungszahl des Rades pro Minute, die Spannung der Kondensatoren und den Ladezustand (die Spannung) der Akkumulatoren.

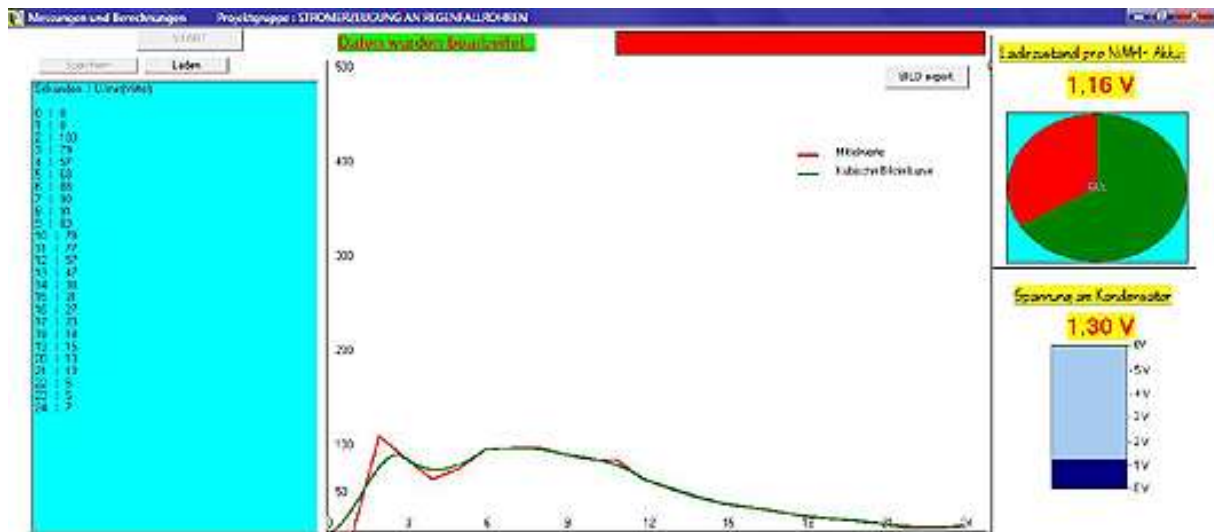


Abb. 7: Delphi-Programm: Umdrehungszahlungsmessung und Auswertung (Links und Diagramm Mitte), Ladezustand der Akkus (Rechts Oben), Spannung am Kondensator (Rechts Unten)

Die momentane Umdrehungszahl pro Minute wird durch eine in das Trägergestell der Achse eingebaute Lichtschranke gemessen. Die Lichtschranke besteht aus einer Lampe (mit Fokussierlinse) und einem Fototransistor. Die Halterungen für die Schaufeln bewegen sich durch den Lichtweg der Lichtschranke und unterbrechen so den Lichtstrahl. Das Interface schaltet dabei die Lampe ein und registriert die Unterbrechungen der Lichtschranke (Fototransistor). Das Programm bestimmt die Zeit zwischen den Unterbrechungen und errechnet daraus die momentane Umdrehungszahl pro Minute. Zusätzlich zur direkten Anzeige der momentanen Daten speichert das Programm alle Werte einer Messreihe und erstellt eine Tabelle, in der zu jedem Messwert die bis dahin verstrichene Zeit (in ms) seit Beginn der Messung aufgelistet wird. Diese Tabelle lässt sich in einer Textdatei speichern und bei Bedarf wieder laden.

Für die Auswertung wird aus allen Werten innerhalb einer Sekunde ein Mittelwert gebildet, um die technisch bedingten Ungenauigkeiten auszugleichen. Diese Werte werden dann ebenfalls tabellarisch aufgelistet und in ein Diagramm übertragen (siehe Abb. 7: Rote Kurve). Danach wird als Ausgleichskurve eine kubische Bézierkurve zwischen je vier Punkten gezeichnet (siehe Abb. 7: Grüne Kurve). Der so entstandene Graph mit den zwei Kurven lässt sich zum späteren Vergleich mit anderen Graphen als Bild im JPEG-Format exportieren.

Die Messung der Spannungen findet unabhängig dazu die ganze Zeit über statt. Die Spannungen werden über die analogen Spannungseingänge des Interfaces gemessen und auch graphisch dargestellt (siehe Abb. 7: Rechte Seite).

## Einbau der Anlage in die Dachentwässerung

Nach unserer Vorstellung wird die Anlage folgendermaßen installiert: Die Turbine befindet sich in einem Kasten (700 mm x 600 mm x 250 mm), den wir zu Präsentationszwecken aus Plexiglas zusammengebaut haben. Dieser Kasten soll unterhalb des Regenfallrohrs in die Erde eingebaut werden und hat an der Ober- und Unterseite jeweils ein

Loch im Durchmesser des Fallrohres. Das ursprüngliche Fallrohr endet 60 cm über der Kastenoberseite, daran wird ein neues spezielles Regenfallrohr, in dem wir eine Fokussiereinrichtung für das Wasser eingebaut haben, angeschlossen. Unterhalb des Kastens wird der normale Wasserabfluss fortgesetzt.

### Fokussiereinrichtung für das Wasser

Bei verschiedenen Experimenten haben wir herausgefunden, dass das Wasser für eine größtmögliche Effizienz möglichst zentriert auf die Schaufeln treffen sollte. Dabei darf das Wasser nicht zu stark abgebremst werden, da sonst ein Teil der Energie „verloren geht“. Unser daraufhin entwickeltes zweiteiliges Fokussiersystem besteht zum einen aus einer Vorfokussierung und der endgültigen Fokussierung. Beide Teile bestehen aus modifizierten Trichtern, wobei der zweite Trichter für die endgültige Fokussierung einen kurzen Schlauch und zusätzlich Überlauflöcher besitzt, um auch große Wassermengen bewältigen und ein Aufstauen des Wassers verhindern zu können.



Abb. 9: Fokussiersystem



Abb. 8: Plexiglaskasten

## Ergebnisse

### Das fertige Produkt (Zusammenfassung)

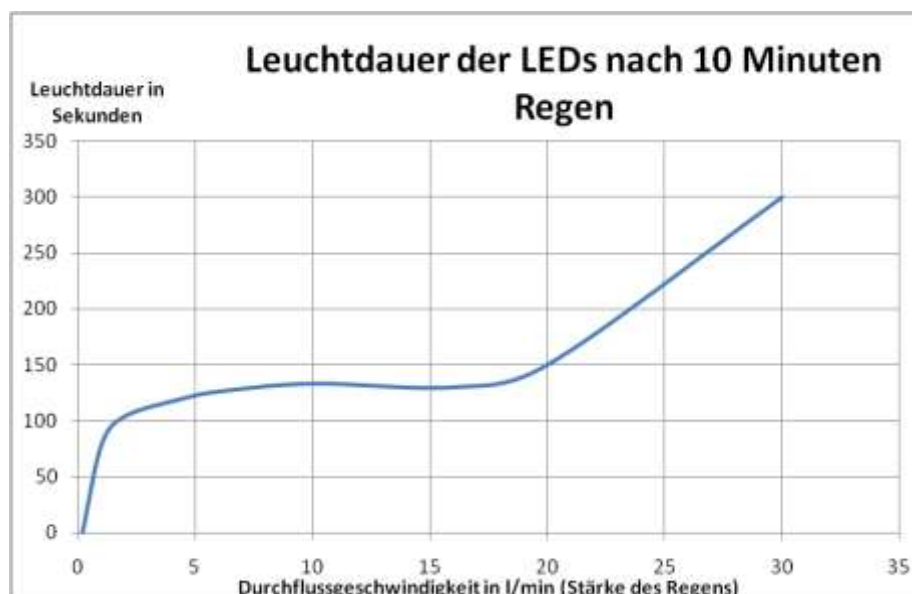
Der Generator speichert die erzeugte elektrische Energie in Akkumulatoren. Man kann, wenn die Akkus ausreichend geladen sind, jederzeit 2 superhelle blaue LEDs einschalten. Dabei ist es egal, ob die Akkus gerade weiter aufgeladen werden (weil sich die Turbine dreht), oder ob die Turbine still steht. Es ist also durchaus möglich, die Akkus gleichzeitig zu laden und Strom abzunehmen.

Außerdem können wir mit dem PC die momentane Umdrehungszahl der Turbine, die aktuell erzeugte Spannung an den Kondensatoren und den Ladezustand der Akkus erfassen und diese Messwerte auswerten. Mithilfe dieser kompletten Versuchsanordnung haben wir einige praktische Versuche durchgeführt, welche im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

### Versuchsergebnisse und Messreihen

Zur Durchführung der Versuchsreihen haben wir jeweils unterschiedliche Durchflussgeschwindigkeiten an Wasser simuliert, indem wir die entsprechende Wassermenge in einem bestimmten Zeitintervall möglichst gleichmäßig in die Regenrinne gegossen haben. So konnten wir verschiedene Regenarten/Regenstärken nachstellen. Während der einzelnen Versuche hat unser Programm die Umdrehungen pro Minute protokolliert und ausgewertet. Vor der Messung haben wir die Akkus genau so weit entladen, dass die LEDs gerade nicht mehr leuchteten. Nachdem wir nun einen bestimmten Regen eine genau definierte Zeitspanne (min. 2 Minuten für bessere Messergebnisse) lang simuliert hatten, haben wir die LEDs eingeschaltet und die Leuchtdauer gestoppt.

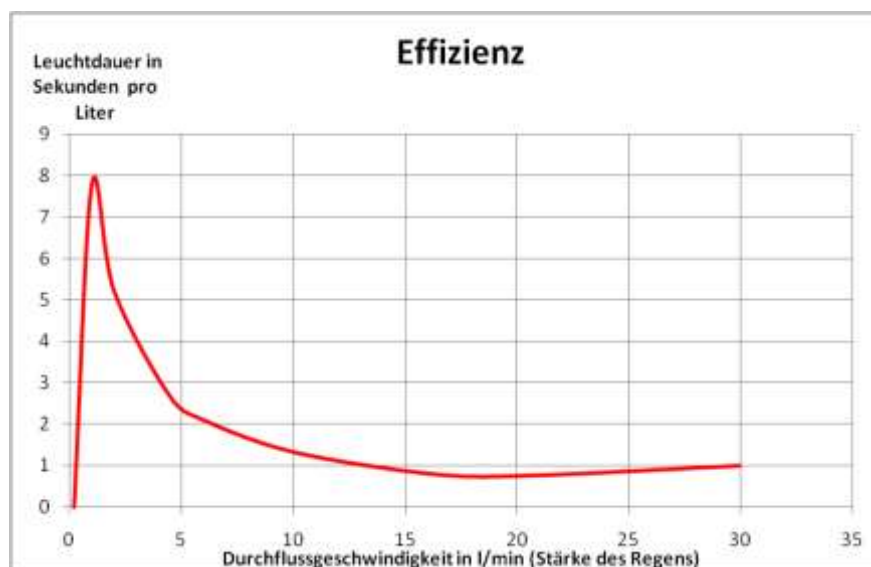
Diese Daten haben wir auf eine einheitliche Regendauer von 10 Minuten linear hochgerechnet, um die Ergebnisse (insbesondere Leuchtdauer) vergleichen zu können. Es ergab sich im Mittel folgende Verteilung der Messwerte:



Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Die minimale Durchflussmenge ist mit 0,26 l/min erstaunlich gering, diese Menge entspricht in etwa einem Nieselregen, bei dem so gerade ein dünnes Rinnsal im Regenfallrohr ankommt. Die Leuchtdauer ist allerdings im Vergleich zur Niederschlagsdauer natürlich sehr gering: Um die zwei superhellen LEDs eine Nacht lang (8 Stunden) leuchten zu lassen, müsste es fünf Tage lang ununterbrochen nieseln. Bei einer Regenmenge von bis zu einem Liter steigt die Leuchtdauer linear an, zwischen zwei und 16 Litern pro Minute bleibt die Leuchtdauer annähernd konstant. Dies wird vermutlich durch unser Fokussierungs-System verursacht, da das Wasser darin in Abhängigkeit von der Durchflussgeschwindigkeit abgebremst und verwirbelt wird und am Ende mit relativ gleicher Geschwindigkeit austritt. Erst ab 16 Litern pro Minute, was bereits einem starken Gewitterregen entspricht, steigt die Leuchtdauer wieder linear an, wobei wir mehr als 30 Liter pro Minute nicht mehr simulieren konnten. Der Anstieg bei so großen Wassermengen kann mit einem zeitweisen Aufstauen des Wassers im Fokussierungs-System erklärt werden. Durch den höheren Druck tritt aus dem Fokussierungs-System ein dickerer und schnellerer Strahl aus, der die Turbine in eine schwungvolle Drehbewegung versetzt.

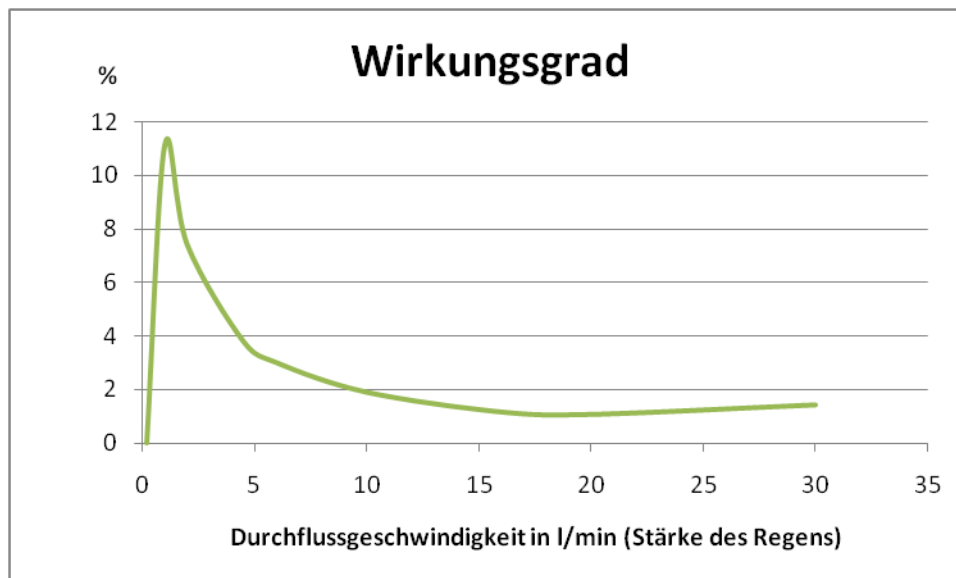
Dann haben wir den Quotienten aus der Leuchtdauer (nach 10 Minuten Regen) und der Anzahl der in zehn Minuten durchgeflossenen Liter Wasser berechnet. Diesen haben wir Effizienz genannt. Die Effizienz ist demnach die mögliche Leuchtdauer pro geflossenem Liter Wasser. Als Mittelwert aus unterschiedlichen Messreihen ergibt sich dabei folgender Graph:



Am Graphen kann man ablesen, dass die Effizienz bei einem Liter Wasser pro Minute am größten ist. Für größere Durchflussmengen nimmt die Effizienz wieder ab und geht gegen einen Grenzwert von ca. einer Sekunde Leuchtdauer pro durchgeflossenem Liter Wasser. Dieser Grenzwert kann mit der Schaufelgröße (40 mm x 40 mm) der Turbine erklärt werden. Diese Querschnittsfläche liegt weit unter der Querschnittsfläche des Regenfallrohres mit einem Durchmesser von 100 mm, sodass ab einer bestimmten Durchflussmenge die Schaufelgröße voll ausgelastet ist und das restliche Wasser vorbei fließt. Bei einem Liter Wasser in der Minute arbeitete das Wasser-Fokussierungssystem optimal, da bei dieser Durchflussmenge das Wasser weder aufgestaut noch erheblich gebremst wird. Zudem reicht

die Wassermenge exakt aus, um eine Schaufel voll zu füllen, ohne dass Wasser vorbei fließt. Durch eine Vergrößerung der Schaufeln könnte man eine Verschiebung der maximalen Effizienz in Richtung größerer Wassermengen erreichen.

Der Wirkungsgrad unserer Anlage ergibt sich aus dem Verhältnis von nutzbarer elektrischer Energie und potentieller Energie des Wassers. Die potentielle Energie berechnet sich nach  $E = m \cdot g \cdot h$ , wobei wir für die Masse die in zehn Minuten durchgeflossene Wassermenge einsetzen. Die nutzbare elektrische Energie berechnet sich nach  $E = U \cdot I \cdot t$ . Da die Ausgangsspannung am Step-Up-Converter wie bereits geschrieben zwischen 3 und 4 Volt variiert, benutzen wir für die Berechnung den Durchschnittswert von 3,5 V. Der Step-Up-Converter liefert entweder null oder 40 mA Strom, somit beträgt die Stromstärke beim Leuchten der LEDs immer 40 mA. Als Zeit  $t$  setzt man die Leuchtzeit ein, wobei wir uns auch hier wieder auf einen zehnminütigen Ladevorgang beziehen. Aus den Quotienten der beiden Energien lässt sich der Wirkungsgrad berechnen. Folgender Graph ergibt sich:



Der Wirkungsgrad ist proportional zur Effizienz und der Verlauf kann auf gleiche Weise erklärt beziehungsweise gedeutet werden. Hier lässt sich erkennen, dass der maximale Wirkungsgrad bei einem Liter pro Minute Durchflussgeschwindigkeit etwas über 11% liegt.

## Anwendungsbezug

Um den Verlauf des Wirkungsgrades an die geographischen Unterschiede in der Regenstärke anzupassen, muss man die Größe der Schaufeln und das untere Element des Fokussierungssystems in seiner Öffnung proportional zur Größe der Schaufeln anpassen. Dann verschiebt sich das Maximum, wie bereits bei der Effizienz erläutert, in die eine oder die andere Richtung.

Mit unserer Anlage ergibt sich bei unserem „normalem Regen“ (siehe oben) von 4,5 Litern pro Minute ein Wirkungsgrad von 3,8 %. Bei einem Dach mit 50 m<sup>2</sup> Entwässerungsfläche pro Fallrohr (unser „Standardhaus“) und 5 Meter Höhe ergibt sich als (in 1 Minute nutzbare) potentielle Energie ein Wert von  $E = 4,5 \text{ Kg} \cdot g \cdot 5\text{m} = 220,65 \text{ J} (\cong 100\%)$ . Unsere Anlage kann daraus pro Minute  $3,8\% \cdot 220,65 \text{ J} = 8,38 \text{ J}$  als elektrische Energie bereitstellen. Die LEDs

benötigen, um 1 Minute zu Leuchten, eine Energie von  $E = U \cdot I \cdot t = 3,5V \cdot 40mA \cdot 60s = 8,4J$ . Das Verhältnis ist also bei unserer Anlage in etwa 1 : 1. Das bedeutet, dass wir (natürlich nicht mit der höchsten Effizienz) um beispielsweise die Beleuchtung in unseren Breiten eine Nacht (8 Stunden) zu betreiben, etwa acht Stunden normalen Regen von 4,5 Litern pro Minute benötigen. Das alleine ist schon ein sehr gutes Ergebnis unserer Projektarbeit. Durch Weiterentwicklung unseres Prototyps ließen sich sogar noch bessere Ergebnisse erzielen:

Würde man, wie oben geschildert, die Anlage so anpassen, dass das Wirkungsgradmaximum von 11% bei 4,5 Litern pro Minute liegt, so würde sich eine nutzbare elektrische Energie von  $E = 11\% \cdot 220,65J = 24,27J$  ergeben. Das Verhältnis von Leuchtzeit zu Ladezeit wäre dann ca. 3 : 1. Das bedeutet, dass es, um die LEDs nachts leuchten zu lassen, tagsüber (oder auch nachts – während des Leuchtens -) etwa zwei Stunden und 40 Minuten lang normalen Regen geben muss.

Da zwei superhelle LEDs genug Helligkeit besitzen, kann man sie problemlos als eine Hausnummernschildbeleuchtung oder eine Beleuchtung für eine Eingangsstufe benutzen. Weil es nicht jeden Tag über zwei Stunden regnet, würde sich das System mit einem Solarpanel optimal ergänzen.

## Kritische Reflexion und Beurteilung der Ergebnisse

Während unserer Versuchsreihen haben wir herausgefunden, dass es durchaus noch einige Verbesserungsmöglichkeiten gibt. So hätten wir beispielsweise die Schaufeln größer machen können, um die Lage des maximalen Wirkungsgrads unserem Wetter anzupassen. Dies konnten wir beim Bau des Prototypen nicht vorhersehen, allerdings haben wir im Gegenzug festgestellt, dass die Anlage bereits bei sehr geringen Regenmengen (Nieselregen, 260 ml pro Minute) Strom erzeugt. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Spulen keine Rastmomente besitzen. Weiterhin kann man auch noch die Elektronik verbessern. Bei unserer bisherigen Schaltung gibt es aufgrund benötigter Bauteile (z.B. Dioden) Spannungsabfälle und damit Energieverluste, obwohl wir diese beispielsweise durch den Einsatz von Schottky-Dioden bereits von 0,7 V pro Diode auf 0,2 V pro Diode reduziert haben. Zusätzlich gäbe es zum Beispiel die Möglichkeit, die erzeugte Energie in einem Goldcap-Kondensator zwischen zu speichern. Der Goldcap-Kondensator hätte bauartbedingt den Vorteil, dass er als Kondensator eine längere Lebensdauer als Akkumulatoren besitzt und viel Energie speichern und auch schnell abgeben kann. Auch dabei könnten Probleme, beispielsweise das der zu geringen Spannung des Goldcap-Kondensators, auftreten. Daher haben wir uns für unsere Schaltung entschieden und diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt.

Insgesamt sind die Ergebnisse, die wir mit unserer Anlage im Praxistest erzielt haben, deutlich besser ausgefallen, als wir erwartet hätten. So haben wir mit einem maximalen Wirkungsgrad von 11% im Vergleich zu Solarzellen (16% bis 19% Wirkungsgrad<sup>3</sup>) einen ziemlich hohen Wirkungsgrad erreicht. Dabei muss man noch bedenken, dass wir diese Ergebnisse als Schüler im ersten Anlauf mit einem Prototypen erreicht haben und die Herstellung in Handarbeit und nicht industriell erfolgte. Durch weitere Forschung und Entwicklung, wie es bei den

---

<sup>3</sup> <http://www.solarserver.de/news/news-10712.html>

Solarzellen in den letzten Jahren der Fall war, ließe sich die komplette Anlage erheblich effizienter gestalten.

## Nachwort

Anfang des Jahres wurden wir von unserem Informatiklehrer (betreuender Lehrer des Projektes) darauf angesprochen, ob wir bei diesem Wettbewerb teilnehmen möchten. Nachdem wir uns trotz der im Frühjahr dieses Jahres anstehenden Abiturprüfungen dafür entschieden hatten, an dem Wettbewerb teilzunehmen, haben wir eine innovative Idee gesucht. Da uns vorher klar war, dass wir mit einer Arbeit aus dem Bereich der Energietechnik teilnehmen wollten, sind wir letztendlich auf die Idee der Stromerzeugung in Regenfallrohren gekommen. Die gesamte Projektphase geschah in selbstständiger Arbeit, alle Entwicklungen und Fortschritte des Projektes erfolgten aus unseren eigenen Ideen und Initiativen. Insgesamt haben wir während des Projektes einiges gelernt, da wir sehr viele praktische Arbeiten durchgeführt haben und insbesondere aus der Lösung von Problemen und der Bewältigung von Rückschlägen neue Erkenntnisse gewonnen haben.

## Danksagung

An dieser Stelle möchten wir unserem Sponsor, der Tridelta Magnetsysteme GmbH für die Bereitstellung verschiedenster Werkstoffe, insbesondere der Magnete danken.

## Angaben über die Projektgruppe

### **Berhalter, Hendrik**

Geburtsdatum: 11.01.1990

### **Krengel, Markus Dino**

Geburtsdatum: 27.10.1989

### **Yu, Xinch**

Geburtsdatum: 06.03.1990

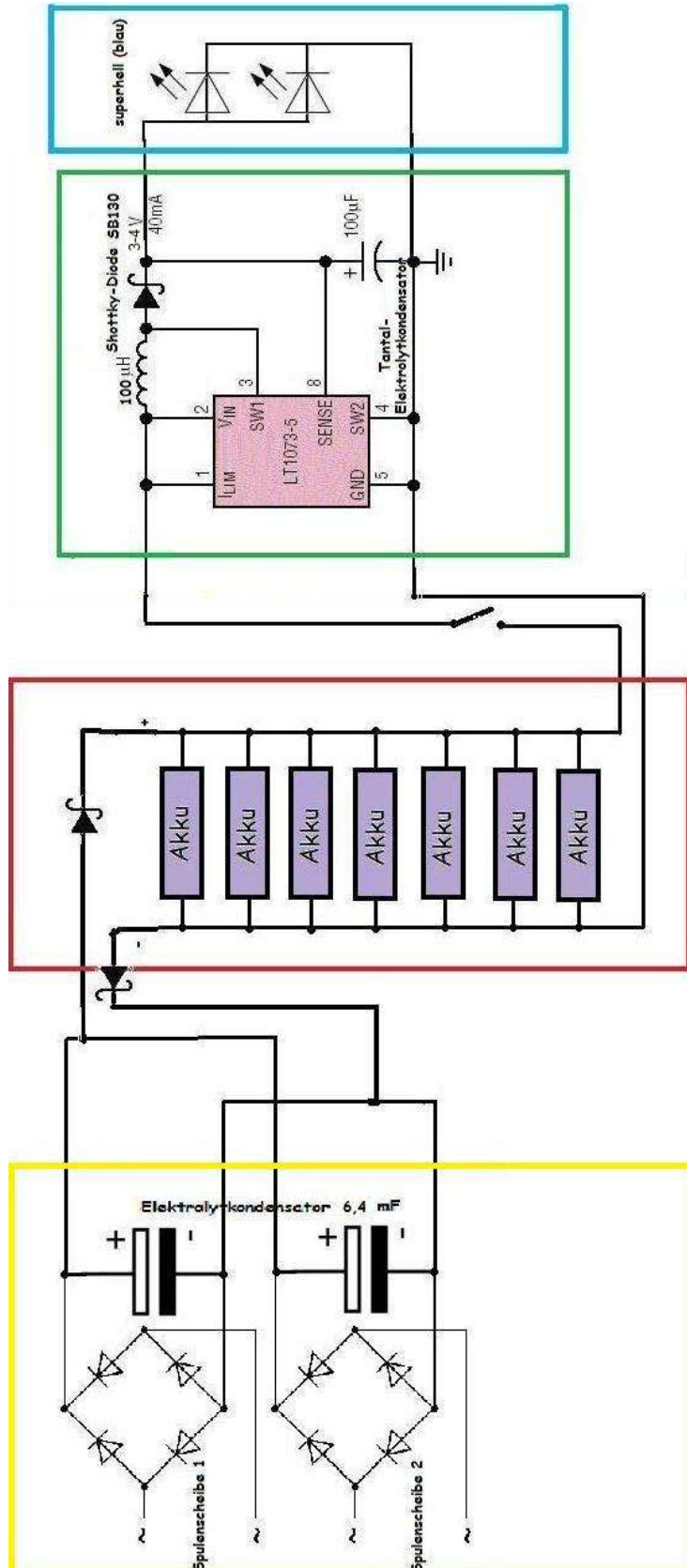
**Schule:** Goethe-Gymnasium Dortmund

**Jahrgangsstufe:** 13 / Abiturienten (Leistungskurse: Physik/Mathe)

# Anhang

## Schaltplan:

Brückengleichrichter (gelb), Akkuzellen (rot), Step-Up-Converter (grün), superhelle LEDs (blau)



## Projektverlauf in Bildern:



Unser Arbeitsplatz



Zuschnitt der Halterungen



Verdrehen



Fertige Halterung



Aufschneiden der Tischtennisbälle



gebohrte Halterung



Drehen der Aluscheibe I



Drehen der Aluscheibe II



Fräsen der Aluscheibe I



Fräsen der Aluscheibe II



Aluscheibe mit Kugellager



Fertiger Rohbau



Versuch bei Regen



Spulenträger



Wickeln der Spulen



Fertige Spule



Anschlussdrähte anlöten



Spulen testen



24 fertige Spulen



Kunststoffscheibe



Kunststoffscheibe mit Spulen



Epoxidharz



Ausgegossene Spulenhaltung



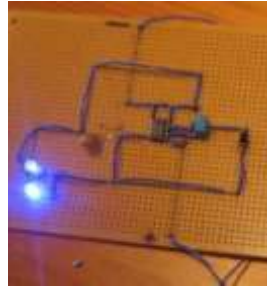
Fertiger Generator



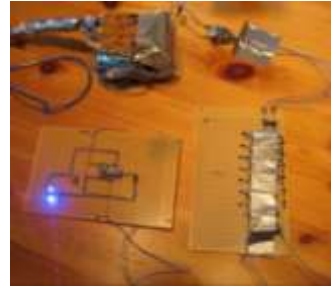
2 Brückengleichrichter mit Kondensatoren



7 NiMH-Akkus (parallel)



Step-Up-Converter und LEDs



Komplette Schaltung



Fokussiersystem



Schaltung auf Brett montiert (+ Interface)



Plexiglastasten



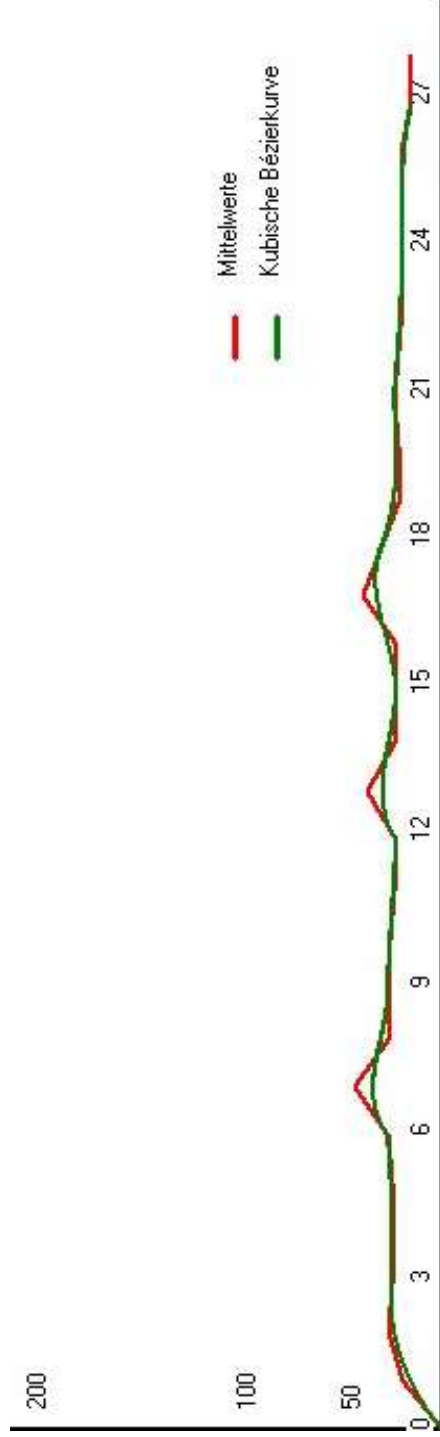
Turbine und Generator (im Kasten)



Versuchsordnung (Elektronik)



Vollständige Versuchsanordnung



**PC-Auswertung: X-Achse: Zeit in Sekunden, Y-Achse: Umdrehungen pro Minute, Durchflussgeschwindigkeit 2 l/min**

## Pressemitteilung

17. Juni 2009

Endrunde VDE-Technikpreis: Projektgruppe „Stromerzeugung an Regenfallrohren“

In ihrem Projekt „Stromerzeugung an Regenfallrohren“ haben die drei Abiturienten Hendrik Berhalter, Markus Krengel und Xinchu Yu vom Goethe-Gymnasium Dortmund eine Anlage entwickelt, welche die Energie des fallenden Wassers in Regenfallrohren ausnutzt, um elektrische Energie zu erzeugen. Dabei haben sie zunächst die optimale Turbinenform ermittelt und dann einen Prototypen gebaut. Diesen Prototypen haben sie durch verschiedene Modifikationen verbessert und die Einsatzmöglichkeiten erweitert.

So konnten sie erreichen, dass die Anlage bereits bei Nieselregen elektrische Energie erzeugt, diese Energie kann sowohl direkt genutzt als auch gespeichert und bei Bedarf abgerufen werden.

Die Beleuchtung von Gartenwegen stellt dabei eine mögliche Anwendungsmöglichkeit dar. So ergänzt die Anlage die kleinen Solarpanels, die oft bei Gartenbeleuchtungen anzutreffen sind, optimal, da nun bei jeder Wetterlage umweltfreundlich Strom im privaten Bereich erzeugt werden kann.

Bei Rückfragen:

Hendrik Berhalter:

Markus Krengel:

Xinchu Yu: