

# Kleinwasserkraftwerk

Pflichtenheft

Windisch, 22.11.2018



<b>Hochschule</b>	Hochschule für Technik - FHNW
<b>Studiengang</b>	Elektro- und Informationstechnik
<b>Autoren</b>	Gruppe 4
<b>Betreuer</b>	Pascal Buchschacher
<b>Auftraggeber</b>	Felix Jenni
<b>Version</b>	1.0

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Übersicht</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangslage . . . . .	1
1.2	Ziele . . . . .	1
1.3	Nicht-Ziele . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Lösungskonzept</b>	<b>3</b>
2.1	Problemstellung . . . . .	3
2.2	Grobkonzept 1 . . . . .	4
2.3	Grobkonzept 2 . . . . .	6
2.4	Grobkonzept 3 . . . . .	8
2.5	Grobkonzept 4 . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>12</b>
3.1	Modell . . . . .	12
3.2	Energieberechnung . . . . .	13
3.3	Nutzwertanalyse . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Detailkonzept</b>	<b>20</b>
4.1	Elektronik . . . . .	20
4.2	Mechanik . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeit</b>	<b>28</b>
5.1	Annahmen . . . . .	28
5.2	Kosten . . . . .	28
5.3	Amortisationszeit . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Projektvereinbarung</b>	<b>30</b>
	<b>References</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>32</b>
7.1	Energieberechnung Grobkonzept 1 . . . . .	32
7.2	Energieberechnung Grobkonzept 2 . . . . .	33
7.3	Energieberechnung Grobkonzept 3 . . . . .	33
7.4	Energieberechnung Grobkonzept 4 . . . . .	34
7.5	Vereinfachtes Modell . . . . .	34

# 1 Übersicht

## 1.1 Ausgangslage

Der Auftrag des Projekts 1 ist der Ersatz von fossilen Ressourcen durch Elektrizität an einem ausgewählten Produkt. Das Team 4 hat sich das Ziel gesetzt, Lösungen zu finden, um die potentielle Energie des fallenden Abwassers in Hochhäusern und Wolkenkratzern in elektrische Energie umzuwandeln. Wird diese Energie zurück ins Gebäude gespeist, leistet unsere Lösung zwar keinen Ersatz von fossilen Ressourcen, aber einen Beitrag zur Reduktion des fossilen oder elektrischen Energieverbrauchs innerhalb von Gebäuden. Durch die Recherchearbeit konnte das Team 4 potentielle Lösungen finden, die nun in diesem technischen Teil des Pflichtenhefts weiter ausgearbeitet und anhand eines Modell-Wolkenkratzers (siehe Subsection 3.1) miteinander verglichen werden.

## 1.2 Ziele

Folgende Ziele hat das Team 4 festgelegt:

Zielkriterium	Zielvariable	Randbedingung
<b>1. Elektrotechnik</b>		
1.1. Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad [%]	>70%
1.2. Leistung	Gesamtleistung [kWh]	möglichst hoch
<b>2. Abwassertechnik</b>		
2.1. Niedriger Platzverbrauch	benötigte Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	möglichst klein
<b>3. Allgemein</b>		
3.1. Schlichtheit	Anzahl verschiedenartiger Bestandteile	möglichst niedrig

### 1.3 Nicht-Ziele

Da das Projekt 1 als Übung für die Abwicklung eines Projekts dient, werden sämtliche praktische Arbeiten wie Realisierung, Validierung und Projektabschluss nicht umgesetzt.

Auch der juristische Teil wird im Projekt 1 nicht beachtet. Folgende Nicht-Ziele wurden definiert:

Nicht-Zielkriterium	Nicht-Zielvariable
1. Planung	Respektierung der Normen Berechnung der Lärmbelastung
2. Realisierung	Erstellen und Testen eines Prototyps

## 2 Lösungskonzept

### 2.1 Problemstellung

Um eine erste Übersicht der möglichen Probleme des Lösungskonzepts zu erhalten, wurden folgende Punkte im Brainstormingverfahren zusammengetragen:

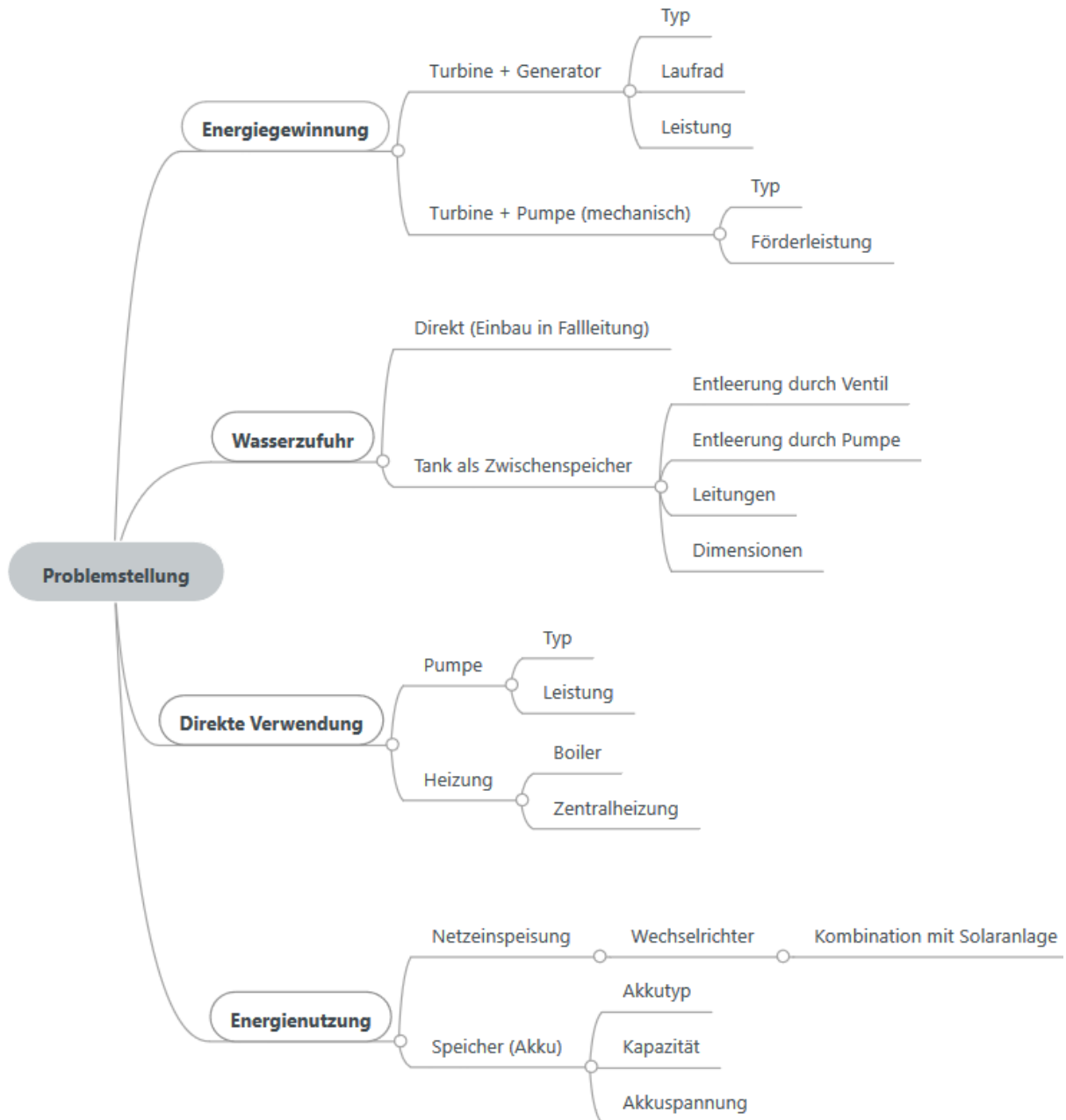


Abbildung 2.1: Baumdiagramm des Lösungskonzepts

## 2.2 Grobkonzept 1

Bestandteil	Typ	Funktion	Anz.
<b>Stromerzeugung</b>			
Wasserrad		Umwandlung in Rotationsenergie	43
Generator	AC	Umwandlung in elektrische Energie	43
Gleichrichter	AC/DC Wandler	Wechselstrom zu Gleichstrom	43
DC/DC Konverter		Regelt die Spannung für den DC Bus	43
Wechselrichter		Umwandlung DC in AC (230V)	1
<b>Kontrollsystem</b>			
PC		Anlagesteuerung	1
SPS	Beckhof	Analoge und Digitale Ein- und Ausgänge	1
<b>Abwassertechnik</b>			
Bypass	Absperrklappe	Umleitung für Wartungsarbeiten und Störungen an den Wasserräder	43

**Tabelle 2.1:** Bestandteilliste Grobkonzept 1

Im Grobkonzept 1 sollen 43 Wasserräder direkt in die Falleitung eingebaut werden. Mit jeweils einem Generator pro Wasserrad wird Strom erzeugt. Damit der Strom der einzelnen Wasserräder zusammengeführt werden kann, muss der Wechselstrom zuerst in Gleichstrom umgewandelt werden. Dieser wird auf einen DC-DC Konverter gelegt. Anschliessend wird der Gleichstrom mit einem Wechselrichter auf die Netz-Spannung umgewandelt. Ein Kontrollsystem steuert die Anlage, überwacht die Energiegewinnung und schreitet bei Störungen ein. In unserem Hochhausmodell (Park Avenue 432) wird immer noch zwei Etagen ein Wasserrad eingebaut, um die maximale Leistung herausholen zu können.

**Vorteile:**

- + platzsparend
- + keine zusätzlichen Leitungen

**Nachteile:**

- Luftwiderstand
- defektanfällig
- AC-DC-AC Umwandlung

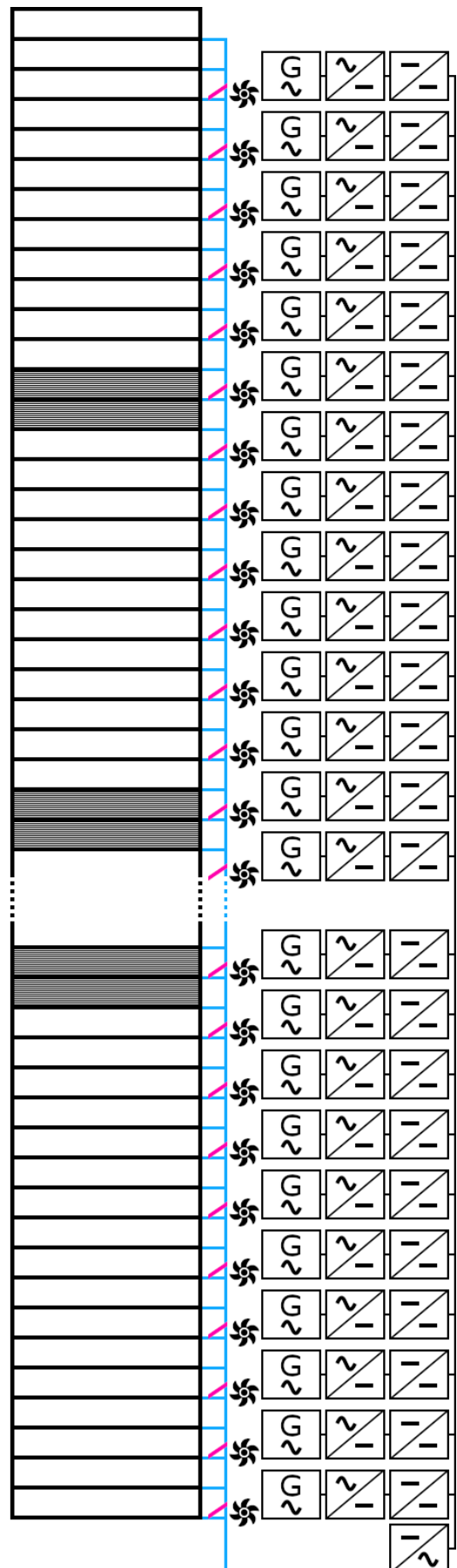


Abbildung 2.2: Schema Grobkonzept 1

### 2.3 Grobkonzept 2

Bestandteil	Typ	Funktion	Anz.
<b>Stromerzeugung</b>			
Turbine	Pelton	Umwandlung in Rotationsenergie	1
Generator	AC	Umwandlung in elektrische Energie	1
Wechselrichter		Einspeisung ins Stromnetz	1
<b>Kontrollsystem</b>			
PC		Anlagesteuerung	1
SPS	Beckhof	Analoge und Digitale Aus- und Eingänge	1
<b>Abwassertechnik</b>			
Tanks		Zwischenspeicher für Abwasser	5
Ablassventil		Entlässt das Abwasser aus dem Tank	5
Entlüftung		Ermöglicht Luftaustausch, entlässt Gase	5
Notüberlauf		Verhindert, dass Tank zu voll wird	5
Füllstandsensor	Vibronik Grenzscharter	Misst den Füllstand des Tanks	5
Druckleitungen		Können Druck standhalten	5
Bypass für Turbine		Ermöglicht Wartung der Turbine	1
Bypass für Tanks		Ermöglicht Wartung & Reingung der Tanks	5
Einwegventile		Verhindern Rückfluss	4

**Tabelle 2.2:** Bestandteilliste Grobkonzept 2

Im Grobkonzept 2 soll die Energieausbeutung gesteigert werden, indem das Abwasser zuerst in Tanks gespeichert wird, die all 14 Stockwerke eingebaut sind. In unserem Hochhausmodell (Park Avenue 432) gibt es nach 12 Stockwerken jeweils zwei Zwischenstockwerke, wo der Einbau möglich wäre. Wenn der Füllstandsensor im Tank erkennt, dass er voll ist, wird das Ventil geöffnet und das Abwasser fließt durch die Druckleitung in den Keller, wo es eine Pelton-Turbine mit Generator antreibt. Die gewonnene elektrische Energie wird über einen Wechselrichter dem Stromnetz zugeführt.

Das Abwasser füllt das Rohr komplett, so dass es keinen Luftwiderstand gibt, der es abbremst. So kann der Wirkungsgrad des Systems verbessert werden. Nur für eine kurze Zeit, bis das Rohr komplett mit Wasser gefüllt ist, tritt Luftwiderstand auf.

Da es im Modellhochhaus in den letzten 17 Stockwerken kein Zwischenstockwerk mehr gibt, bleibt das Abwasser dieser Stockwerke ungenutzt.

Die baulichen Massnahmen, die nötig sind, um dieses System zu installieren sind beträchtlich. Es müssen Tanks eingebaut und Druckleitungen zur Turbine verlegt werden, welche im Keller installiert werden müssen. Die bestehenden Abwasserleitungen müssen neu so verlegt werden, dass sie in die Tanks führen. Somit ist es eher für Neubauten geeignet als zur Nachrüstung.



Um zu verhindern, dass es in den Tanks zu Ablagerungen kommt, ist der Boden der Tanks trichterförmig. Ablagerungen werden dadurch beim Öffnen des Ventils weggespült. Sollte es trotzdem nötig sein, die Tanks zu reinigen, gibt es einen Bypass, mit dem das Abwasser am Tank vorbeigeführt werden kann. Er kann dann entleert und gereinigt oder repariert werden. Auch die Turbine hat einen Bypass, der Wartungsarbeiten ermöglicht.

Jeder Tank ist mit einem Überlauf ausgestattet, der verhindert, dass ein Tank zu voll wird wenn z.B. der Ablauf verstopft ist. Das überschüssige Abwasser wird dann in einem Rohr in die Falleitung wenige Stockwerke tiefer geleitet. Von dort gelangt es in den nächsten Abwassertank. Der Füllstandsensoren im Tank erkennt, wenn der Pegel zu hoch wird und sendet eine Warnung. Falls aus irgendeinem Grund mehr als eines der Ventile gleichzeitig geöffnet würde, könnte es zu einem Rückstau kommen, bei dem Abwasser durch die Druckleitungen vom höher gelegenen Tank in einen tieferen fließt. Um dies zu verhindern, werden in den Druckleitungen Einwegventile eingebaut. Der höchstgelegene Tank benötigt kein solches Ventil.

Ein Kontrollsystem steuert die Anlage und überwacht die Energiegewinnung und schreitet bei Störungen ein. Die Gewonnene Energie kann ins Netz zurück gespeist werden.

#### Vorteile:

- + Luftwiderstand nur während Füllung
- + Nur eine Turbine
- + Keine AC-DC-AC Umwandlung
- + geregelte Wasserflussmenge

#### Nachteile:

- braucht sehr viel Platz
- bauliche Massnahmen
- Luftwiderstand während Füllung
- lange Druckleitungen
- Abwasser der untersten 17 Stockwerke ungenutzt

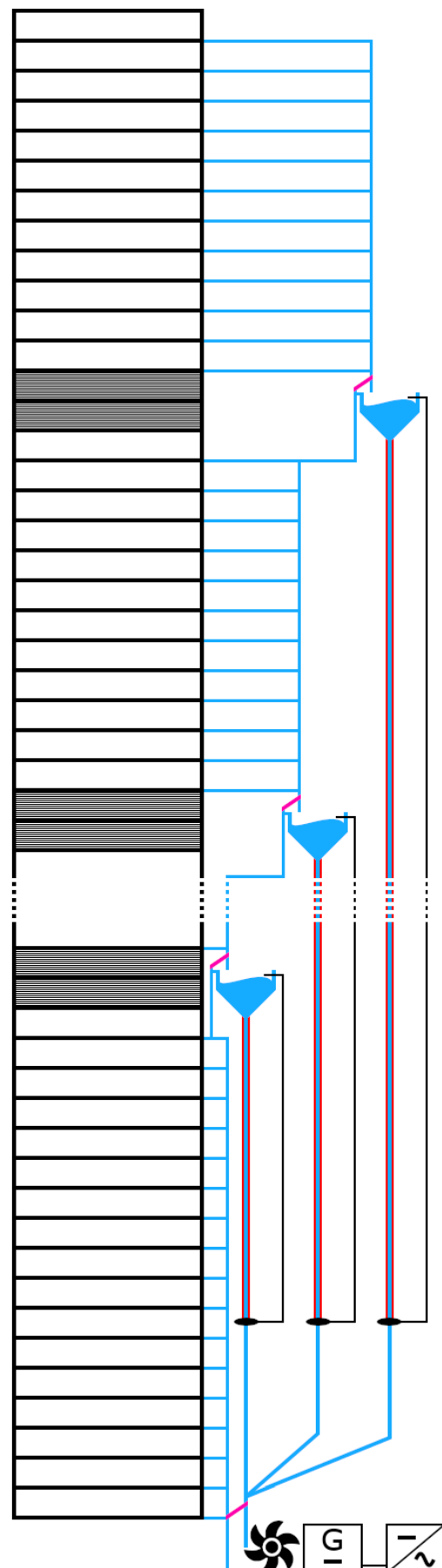


Abbildung 2.3: Schema Grobkonzept 2

## 2.4 Grobkonzept 3

Bestandteil	Typ	Funktion	Anz.
<b>Stromerzeugung</b>			
Turbine	Pelton	Umwandlung in Rotationsenergie	5
Generator	AC	Umwandlung in elektrische Energie	5
Gleichrichter	AC/DC Wandler	Wechselstrom zu Gleichstrom	5
DC/DC Konverter		Regelt die Spannung für den DC Bus	5
Wechselrichter		Umwandlung DC in AC (230V)	1
<b>Kontrollsystem</b>			
PC		Anlagesteuerung	1
SPS	Beckhof	Analoge und Digitale Ein- und Ausgänge	1
<b>Abwassertechnik</b>			
Tanks		Zwischenspeicher für Abwasser	5
Ablassventil		Entlässt das Abwasser aus dem Tank	5
Entlüftung		ermöglicht Luftaustausch, entlässt Gase	5
Notüberlauf		Verhindert, dass Tank zu voll wird	5
Füllstandsensor	Vibronik Grenzscharter	Misst den Füllstand des Tanks	5
Druckleitungen		Können Druck standhalten	5
Bypass für Turbine		ermöglicht Wartung der Turbine	5
Bypass für Tanks		ermöglicht Wartung & Reinigung der Tanks	5

**Tabelle 2.3:** Bestandteilliste Grobkonzept 3

Dieses Grobkonzept ist fast identisch zu Grobkonzept 2. Es gibt wieder mehrere Tanks in einem Abstand von 14 Stockwerken, in denen das Abwasser zwischengespeichert wird. Allerdings gibt es nicht nur eine, sondern gleich viele Turbinen wie Tanks. Das Abwasser fließt von einem Tank 14 Stockwerke nach unten, durch eine Turbine und dann in den nächsten Tank. Bei Grobkonzept 2 kann es unter Umständen relativ lange dauern, bis die Rohre komplett mit Wasser gefüllt sind. Bis das der Fall ist, kommt es zu Luftwiderstand in der Leitung, der das Abwasser abbremst. Bei jedem Tank eine Turbine einzubauen hat den Vorteil, dass die Rohre kürzer sind und so nach öffnen des Ventils schneller komplett mit Wasser gefüllt werden. So wird die Zeit verkürzt, in der Luftwiderstand auftritt. Ausserdem ist der Druck in den Leitungen geringer, man kann also günstigere Rohre und Ventile verwenden. Da im Vergleich zu Grobkonzept 2 keinen Rückstau geben kann, ist es nicht nötig, Einwegventile in die Druckleitung einzubauen. Damit der Strom der Turbinen zusammengeführt werden kann, muss der Wechselstrom zuerst in Gleichstrom umgewandelt werden. Dieser wird auf einen DC-DC Konverter gelegt damit kein Strom zurück in den Generator fließen kann.

Anschliessend wird der Gleichstrom mit einem Wechselrichter auf Netz-Spannung umgewandelt.

Ein Kontrollsystem steuert die Anlage und überwacht die Energiegewinnung und schreitet bei Störungen ein.

**Vorteile:**

- + Luftwiderstand nur während Füllung
- + kurze Druckleitungen
- + geregelte Wasserflussmenge

**Nachteile:**

- Braucht viel Platz
- grössere bauliche Massnahmen
- Mehrere Turbinen
- AC-DC-AC Umwandlung
- Abwasser der untersten 17 Stockwerke ungenutzt

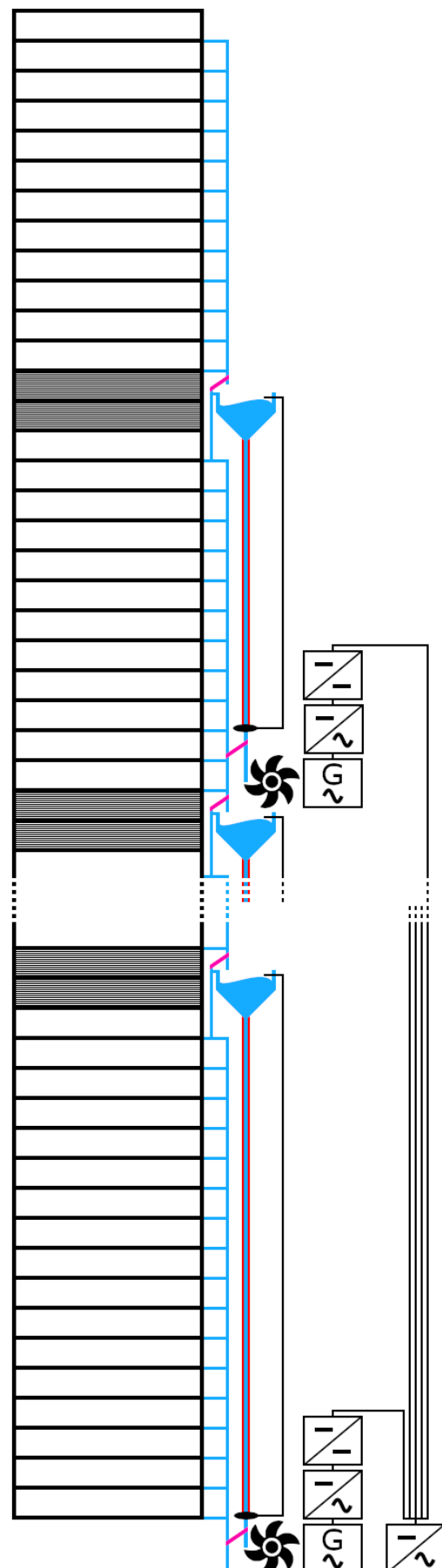


Abbildung 2.4: Schema Grobkonzept 3

## 2.5 Grobkonzept 4

Bestandteil	Typ	Funktion	Anz.
<b>Stromerzeugung</b>			
Rohrkette		Umwandlung potenzielle Energie zu Rotation	6
Zahnrad		Umdehungszahl für Generator anpassen	6
Generator	AC	Umwandlung in elektrische Energie	6
Gleichrichter	AC/DC Wandler	Wechselstrom zu Gleichstrom	6
DC/DC Konverter		Regelt die Spannung für den DC Bus	6
Wechselrichter		Umwandlung DC in AC (230V)	1
<b>Kontrollsystem</b>			
PC		Anlagesteuerung	1
SPS	Beckhof	Analoge und Digitale Ein- und Ausgänge	1
<b>Abwassertechnik</b>			
Ventile	Absperrklappe	Umleitung in Falleitung für Wartungsarbeiten am Wasserlift	74
Falleitung		Für Wartungsarbeiten	1

**Tabelle 2.4:** Bestandteilliste Grobkonzept 4

Im Grobkonzept 4 wird die potenzielle Energie des Abwassers mit einem Wasserlift ausgenutzt. Der Lift besteht aus einer Umlaufenden Kette, an der runde, tellerförmige Schaufeln befestigt sind. Die Kette bewegt sich durch zwei parallele, vertikal verlegte Rohre, in einen nach oben und im anderen nach unten. Am oberen und unteren Ende wird die Kette mit einem Rad in das andere Rohr umgelenkt. Das Abwasser fließt aus dem jeweiligen Stockwerk in eine der Schaufeln und treibt den Lift durch sein Gewicht an. Das Abwasser wandert im Lift nach unten und wird am tiefsten Punkt entleert. Die Drehbewegung, welche die Rohrkette dabei erzeugt, ist eher langsam. Daher muss die Drehzahl mit einem Getriebe erhöht werden, damit die Mindestdrehzahl des Generators erreicht wird.

Während Wartungsarbeiten wird das Abwasser mittels Ventilen in eine Falleitung umgeleitet. Damit der Strom der Turbinen zusammengeführt werden kann, muss der Wechselstrom zuerst in Gleichstrom umgewandelt werden. Dieser wird auf einen DC-DC Konverter gelegt, damit kein Strom zurück in den Generator fließen kann. Anschliessend wird der Gleichstrom mit einem Wechselrichter auf Netz-Spannung umgewandelt.

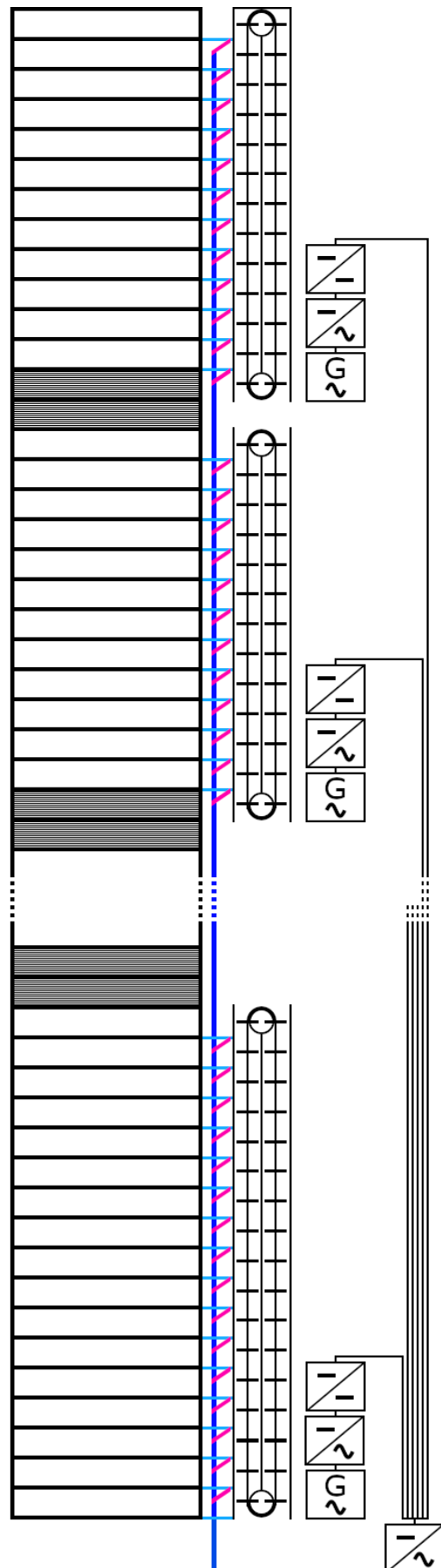
Ein Kontrollsystem steuert die Anlage, überwacht die Energiegewinnung und schreitet bei Störungen ein. Die 5 oberen Lifte haben eine Länge von 66.08m, der unterste Lift 80.24m. Für Wartungsarbeiten existiert eine zusätzliche Leitung, die mittels Ventilen angesteuert wird.

**Vorteile:**

+ platzsparend

**Nachteile:**

- viele Ventile
- Lufwiderstand



**Abbildung 2.5:** Schema Grobkonzept 4

### 3 Auswertung

#### 3.1 Modell

Für die Berechnung der potentiellen Energie benützen wir das Modell Park Avenue 432, eines der höchsten reinen Wohnhochhäusern auf der Welt. Die stolze Höhe und der über das ganze Gebäude gleichbleibende quadratische Grundriss sind ideal für unsere Berechnungen. Für die Wassermengenberechnung stützen wir uns auf die Angaben des durchschnittlichen Wasserverbrauchs in Amerika pro Person und Tag: 314L. [1]



**Abbildung 3.1:** Park Avenue 432 [2]

Name:	Park Avenue 432
Höhe:	426m
Etagen:	84 Obergeschosse, 1 Erdgeschosse, 3 Untergeschosse
Etagenhöhe:	4.72m
Höchste Etage:	392.1m
Wohnungen:	104
Speziell:	alle 12 Etagen 2 Etagen leer
Nutzbare Etagen:	74

### 3.2 Energieberechnung

Die Endgeschwindigkeit des Abwassers kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Die Einheit der Geschwindigkeit  $v$  ist m/s, das Schwerefeld  $g$  auf der Erde besitzt den Wert 9.81 N/kg, und die Höhe  $h$  hat die Einheit m.

Die Energie, die gewonnen werden kann, wird mit folgender Formel berechnet:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

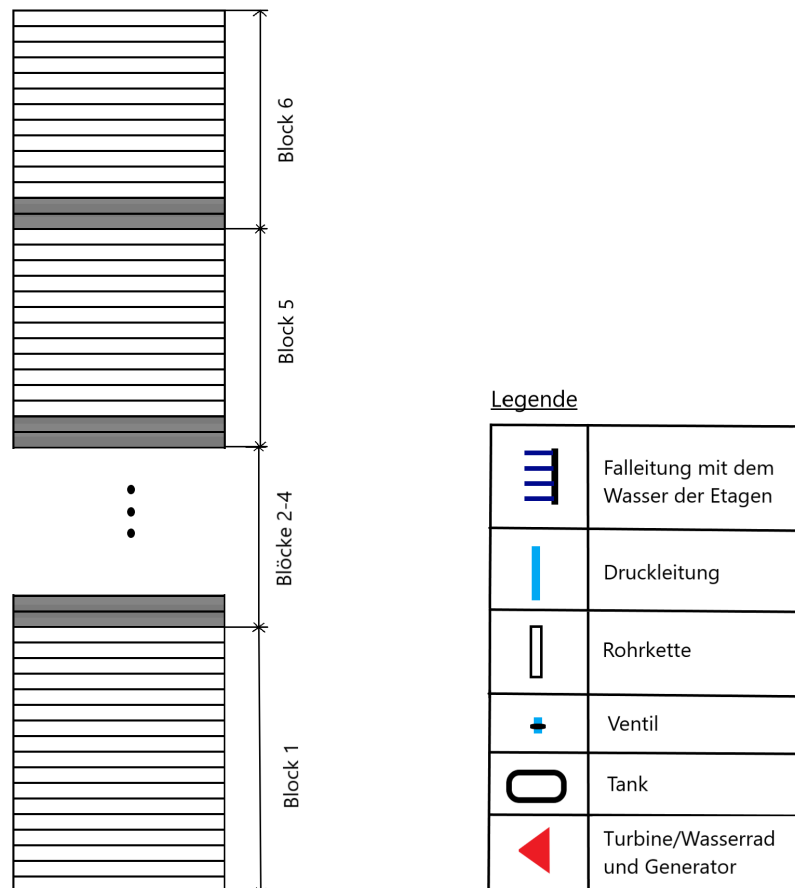
Die Energie  $E$  hat die Einheit J, die Einheit der Geschwindigkeit  $v$  ist m/s, und die Masse  $m$  hat die Einheit kg

Um die Leistung in kWh zu erhalten wird folgende Formel verwendet:

$$P = \frac{E \cdot \eta}{3.6\text{MJ}}$$

Die Leistung  $P$  hat die Einheit W und der Wirkungsgrad  $\eta$  besitzt keine Einheit.

Mit diesen mathematischen Grundlagen kann nun von jedem Grobkonzept die Leistung anhand des Modellhochhauses berechnet werden. Für die Berechnungen wird angenommen, dass pro Wohnung 2.5 Personen leben und diese einen Durchschnittsverbrauch pro Tag von 785L haben. Bei 146 Wohnungen und 74 Nutzbaren Etagen leben 5 Personen pro Etage. Es wird somit 1570L pro Etage pro Tag verbraucht. Im Anhang befindet sich das vereinfachte Modell (7.5 Vereinfachtes Modell) des Hochhauses, von dem die Berechnungen ausgehen. Das gesamte Hochhaus wird zur Vereinfachung in 6 Blöcke unterteilt. Dies ist, zusammen mit einer Legende für die benutzten Symbole, in der Abbildung 3.2 Blockeinteilung des Hochhauses ersichtlich.



**Abbildung 3.2:** Blockeinteilung des Hochhauses



### Grobkonzept 1

Im Grobkonzept 1 wird die Geschwindigkeit des Abwassers ausgenutzt. Wie bereits im Rechendokument [3] berechnet, wird das Wasser ab ca. 10m nicht mehr merklich schneller. Um möglichst viel Energie zu erzeugen wird in jeder zweiten Etage, also alle 9.44m ein kleines Wasserrad eingebaut. Insgesamt werden 43 Wasserräder eingebaut. Dies ist in der Abbildung 3.3 Prinzip Grobkonzept 1 ersichtlich. Die Geschwindigkeit des Abwassers beträgt bei einer Höhe von zwei Etagen 8.5m/s und bei einer Etage 6.5m/s

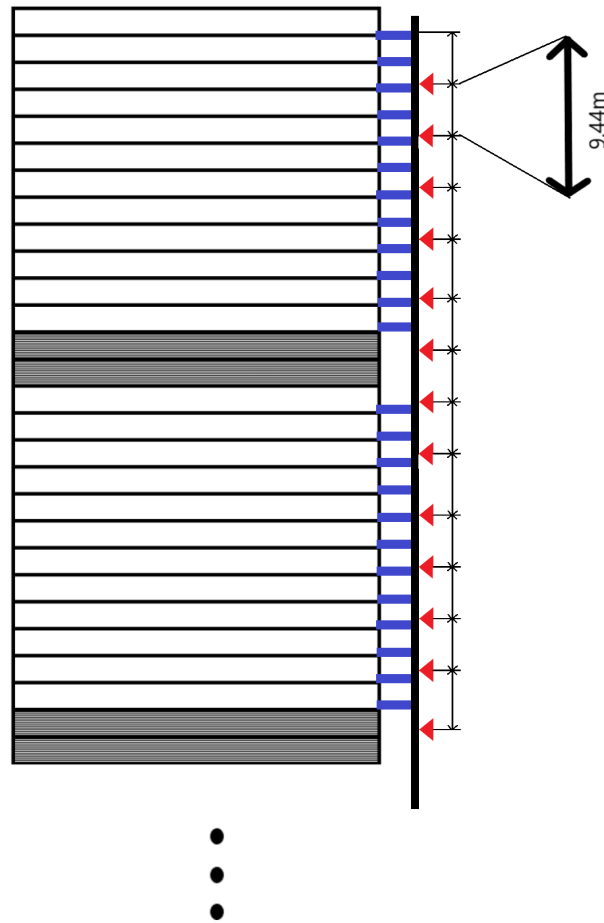
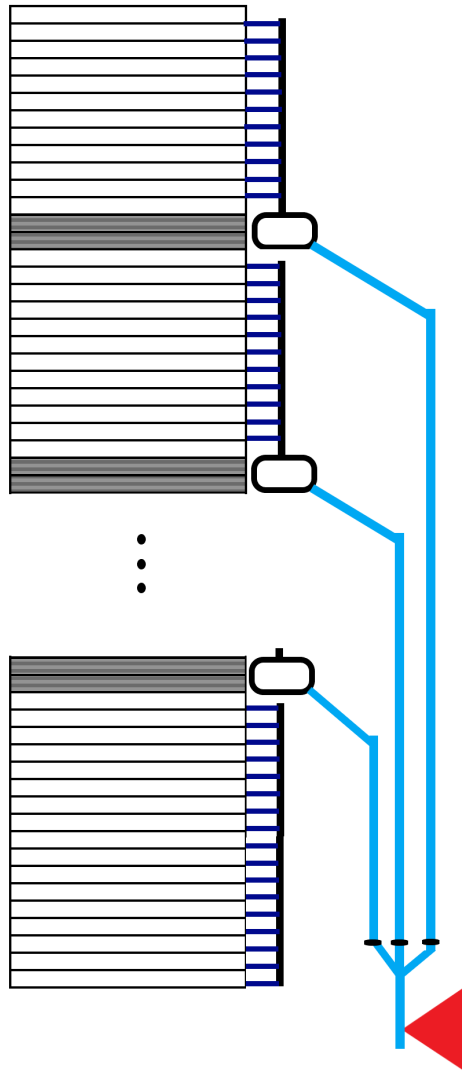


Abbildung 3.3: Prinzip Grobkonzept 1

Mit diesem Konzept wird insgesamt 21.5kWh pro Tag gewonnen, dies entspricht bei Stromkosten von 20rp einem Wert von 4.30Fr. Die Leistungsberechnungen sind im Anhang 7.1 Berechnung Grobkonzept 1 zu finden.

## Grobkonzept 2

Im Grobkonzept 2 wird die Geschwindigkeit des Abwassers ausgenutzt. Um den Luftwiderstand zu eliminieren, werden nun Druckleitungen eingebaut, die komplett mit Abwasser gefüllt werden. So kann eine grössere Geschwindigkeit erreicht werden. In den unbenutzten Etagen wird das Wasser gesammelt und mit einer Druckleitung bis zur Turbine ganz unten geführt. Dies ist in der Abbildung 3.4 Prinzip Grobkonzept 2 ersichtlich.

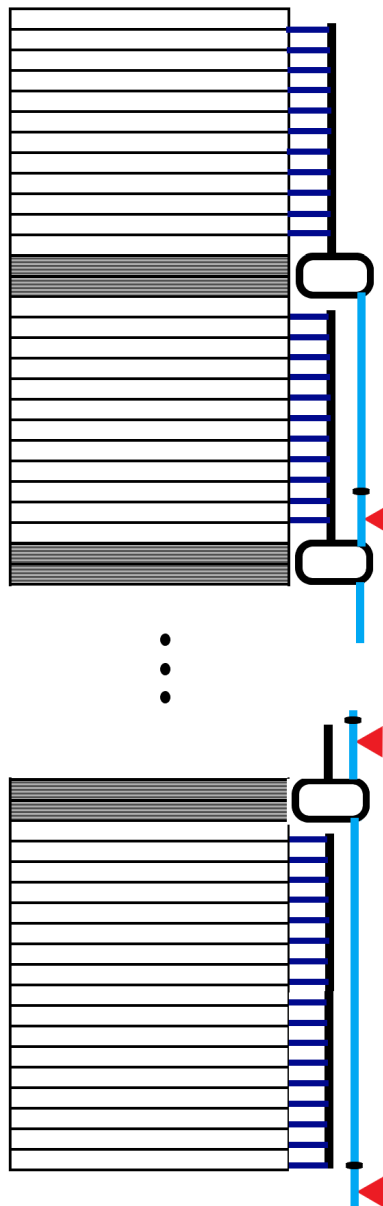


**Abbildung 3.4:** Prinzip Grobkonzept 2

Mit diesem Konzept wird insgesamt 44.59kWh pro Tag gewonnen, dies entspricht bei Stromkosten von 20rp einem Wert von 8.92Fr. Die Leistungsberechnungen sind im Anhang 7.2 Berechnung Grobkonzept 2 zu finden.

**Grobkonzept 3**

Im Grobkonzept 3 wird die Geschwindigkeit des Abwassers ausgenutzt. Auch hier werden Druckleitungen eingebaut, um den Luftwiderstand zu eliminieren. So kann eine grössere Geschwindigkeit erreicht werden. In den unbenutzten Etagen wird das Wasser gesammelt und mit einer Druckleitung bis zur Turbine vor dem nächsten Tank geführt. Dies ist in der Abbildung 3.5 Prinzip Grobkonzept 3 ersichtlich.

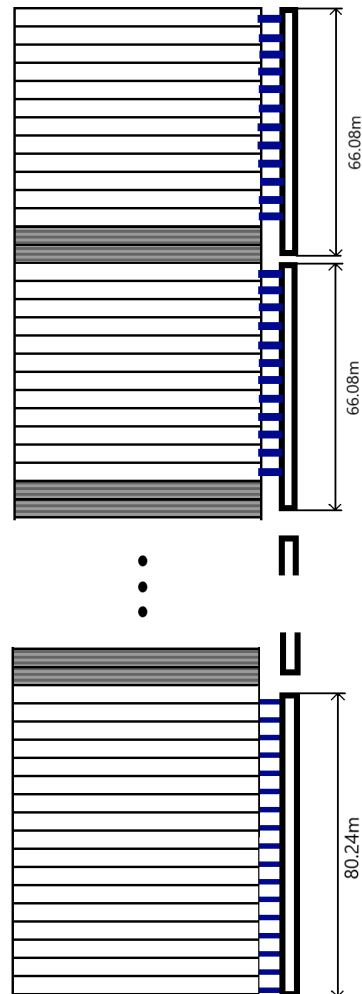


**Abbildung 3.5:** Prinzip Grobkonzept 3

Mit diesem Konzept wird insgesamt 42.62kWh pro Tag gewonnen, dies entspricht bei Stromkosten von 20rp einem Wert von 8.53Fr. Die Leistungsberechnungen sind im Anhang 7.3 Berechnung Grobkonzept 3 zu finden.

### Grobkonzept 4

Im Grobkonzept 4 wird die potenzielle Energie des Abwassers ausgenutzt. Damit die Wasserlifte nicht zu lang werden, werden diese Blockweise verbaut. Dies ist in der Abbildung 3.6 Prinzip Grobkonzept 4 ersichtlich. Die obersten 5 Abschnitte bestehen aus 12 bewohnten und 2 ungenutzten Etagen. Der unterste Block besteht aus 16 bewohnten Etagen. Somit haben 5 Lifte eine Länge von 66.08m und der unterste Lift eine Länge von 80.24m



**Abbildung 3.6:** Prinzip Grobkonzept 4

Mit diesem Konzept wird insgesamt 53.08kWh pro Tag gewonnen, dies entspricht bei Stromkosten von 20rp einem Wert von 10.62Fr. Die Leistungsberechnungen sind im Anhang 7.4 Berechnung Grobkonzept 4 zu finden.

3.3 Nutzwertanalyse

Das Team konnte durch folgende Nutzwertanalyse bestimmen, dass das Grobkonzept 4 am ehesten in Frage kommt.

Zielkriterium	Gewichtung	Max		Grobkonzept 1		Grobkonzept 2		Grobkonzept 3		Grobkonzept 4	
		Nutzwert		Wert	Erfüllungsgrad	Nutzwert		Wert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	
Elektrotechnik											
1.1. Wirkungsgrad	25%	1.25		32%	1	0.25		67.2%	3	0.75	
1.2. Leistung	30%	1.50		21.5kWh	1	0.33		44.6kWh	2	0.66	
Abwassertechnik											
2.1. Platzbedarf	25%	1.00		mässig	4	1.00		erhöht	2	0.50	
Allgemein											
3.1. Schlichtheit	20%	1.00		8	4	0.80		15	3	0.60	
Summe	100.0%	5.000				2.38				2.51	
Erfüllungsgrad [%]		100.0				48				50	
Rangfolge						3				2	
											1

Erfüllungsgrad						
min.		mittel		max.		
1	2	3	4	5	Messgrösse	
1.1. Wirkungsgrad	<50	51-60	61-70	71-80	>81	%
1.2. Leistung	<40	40-44	45-50	51-54	>55	kWh
2.1. Platzbedarf	hoch	erhöht	mittel	mässig	gering	Schätzung m²
3.1. Schlichtheit	>20	20-16	15-11	10-6	1-5	Anz. versch. Teile

Tabelle 3.1: Nutzwertanalyse

## 4 Detailkonzept

Das Konzept mit den Wasserliften ist am besten geeignet für unsere Anwendung. Es existieren bereits «Rohrkettenförderer», aber diese werden ausschliesslich verwendet, um Produkte nach oben zu befördern. Wir nutzen dieses System, um das Abwasser nach unten zu befördern und dabei Energie zu gewinnen. Es werden insgesamt sechs Lifte benötigt. Fünf Lifte überwinden je 60.08m und der unterste Lift überwindet 80.24m. In der Abbildung 3.6 Prinzip Grobkonzept 4 ist dies grafisch dargestellt.

### 4.1 Elektronik

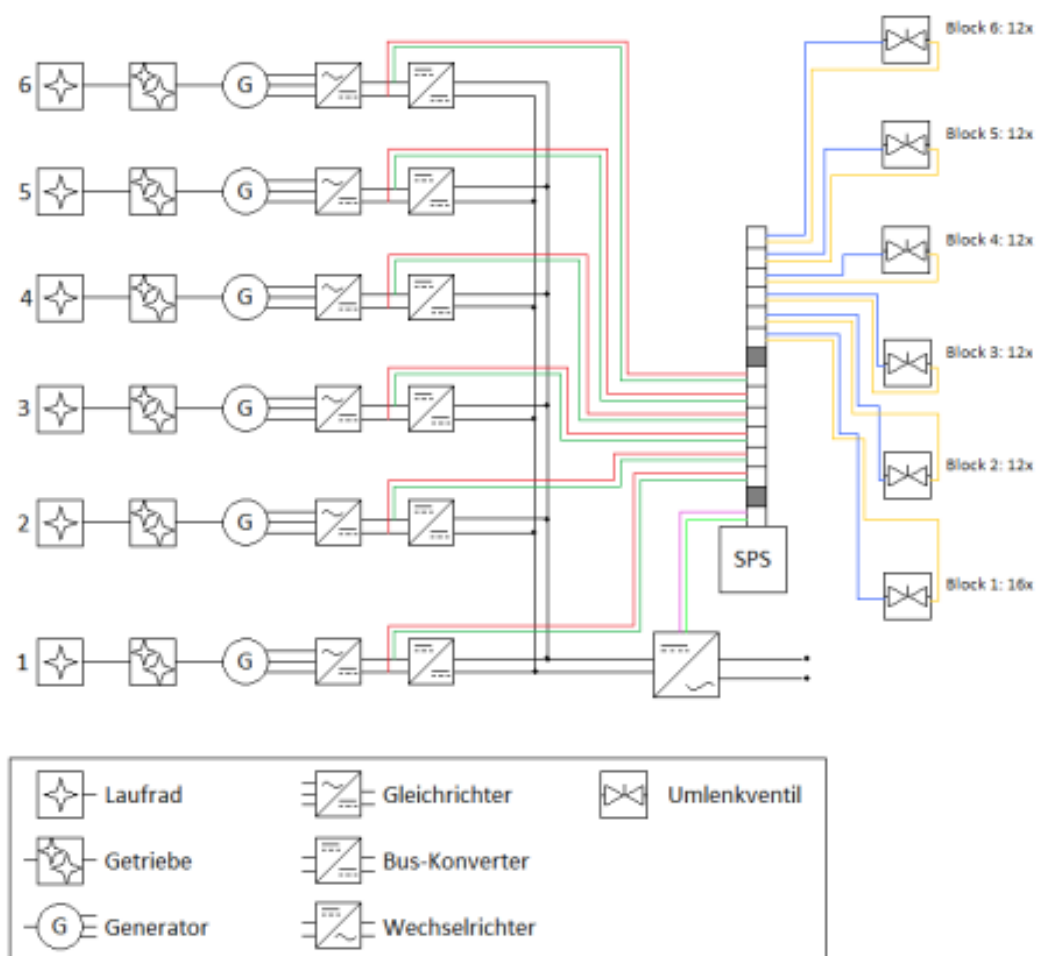


Abbildung 4.1: Prinzipschema

Die potentielle Energie des Abwassers wird über ein Laufrad in kinetische Energie umgewandelt. Mit einem Getriebe wird die vom Laufrad kommende Drehzahl dem Generator angepasst, welcher die kinetische Energie in elektrische umwandelt. Der Gleichrichter transformiert den Dreiphasenwechselstrom in einen zweipoligen Gleichstrom. Anschliessend wird durch einen DC-DC Konverter eine Rückkoppelung auf den Generator verhindert. Weiter stellt der Konverter sicher, dass eine stabile Ausgangsspannung anliegt und der DC-Bus galvanisch vom Generator und vom Wechselrichter getrennt ist. Die summierte Energie aller sechs Generatorenstränge wird

über einen Wechselrichter ins Stromnetz eingespeist. Zur Überwachung und auch zur Ansteuerung der Umlenkventile wird eine SPS verwendet.

### Generator

Der Wasserverbrauch und somit die Abwasserproduktion im Hochhaus ist nicht über den ganzen Tag konstant. Für die Dimensionierung der Bauteile ist es aber wichtig, den Spitzenwert der Abwasserproduktion zu kennen. Dieser kann aus Abbildung 4.2 ausgelesen werden und liegt zwischen 7 und 8 Uhr morgens. Während dieser Stunde fließt etwa 15% des Abwassers ab, also müssen alle Komponenten auf diese Spitzenbelastung ausgelegt sein. Der unterste Lift ist am längsten und befördert gleichzeitig die gesamte Abwassermenge. Es wurde berechnet, dass er pro Tag  $70.22 MJ$  potentielle Energie aufnimmt. Mit einem Wirkungsgrad von 80% des Liftes ergibt das  $56.3 MJ$ , die der Generator umsetzen muss, 15% oder  $8.4 MJ$  dieser Energie zwischen 7 und 8 Uhr morgens. Der Generator muss also eine Mindestleistung von  $8.4 MJ / 3600s = 2333 W$  aufweisen. Da die Abwassermenge auch während dieser Stunde nicht ganz konstant ist und zeitweise höher sein könnte, sollte der Generator eine Mindestleistung von  $3 kW$  haben.

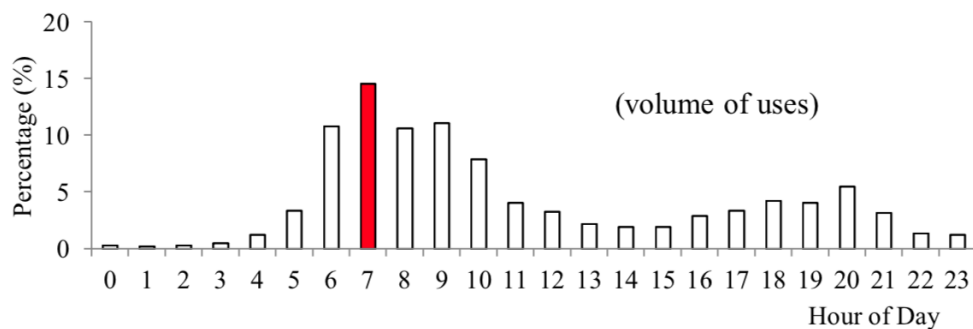


Abbildung 4.2: Typische Tagesgangkurve. [4]

Aufgrund dieser Berechnungen haben wir uns für einen Eastern Lion STC-3 Dreiphasengenerator entschieden (Siehe Abbildung 4.3).

**Eastern lion**



Abbildung 4.3: Eastern Lion STC-3 [5]

Dieser Generator ist mit einem Preis von 110\$ sehr günstig und erfüllt mit einer Leistung von 3 kW unsere Anforderungen.

Anforderung	Wert
Leistung	3kW
Ausgang	3 Phasen 380V/120V
Drehzahl	1500 bis 1800U/min
Wirkungsgrad	92%
Kosten	110CHF

**Tabelle 4.1:** Anforderungen an den Generator

### Gleichrichtung nach Generator

Die dreiphasige Wechselspannung des Generators wird mit einem Gleichrichter in Gleichspannung umgewandelt. Wir haben uns für einen SETEC SET4850 Gleichrichter entschieden (siehe Abbildung 4.4). Dieser besteht nicht nur aus einem Dreiphasen-Gleichrichter, sondern ist auch ein Netzteil, das unter anderem einen geregelten 48Vdc Ausgang hat. Dieser Ausgang kann somit direkt über den DC Bus mit den Wechselrichtern der anderen Turbinen parallel geschaltet werden. Gesteuert und überwacht wird das Gerät über einen RS 485 Bus.



**Abbildung 4.4:** Setec SET4850 [6]

Anforderung	Wert
Leistung	3kW
Eingang	AC 3 * 380V
Ausgang	DC 48V/110V/220V
Genauigkeit	$\pm 0.5\%$
Wirkungsgrad	96%
Steuerung	RS 485
Kosten	300CHF

**Tabelle 4.2:** Anforderungen an den Gleichrichter

### Wechselrichter für Netzeinspeisung

Damit die gewonnen Leistung in das Netz eingespeisen werden kann, muss der Wechselrichter folgende Eigenschaften aufweisen.



Anforderung	Wert
Leistung	9kW
Ausgang	3 Phasen
Kosten	<4000CHF

**Tabelle 4.3:** Anforderungen an den Wechselrichter

In der Förderungsanlage wird ein Asynchrongenerator verbaut. Die Firma Voltacon ist bekannt für ihre Hochleistungswechselrichter.

Das Modell Hybrid Wechselrichter HSI10000 entspricht den gewünschten Anforderungen für unsere Förderungsanlage. Der Wechselrichter transformiert die 48VDC auf 230VAC mit einer Frequenz von 50Hz. Das Gerät kann bis zu einer Leistung von 10KW erbringen. Mittels integrierten Displays kann die erbrachte Leistung zusätzlich abgelesen werden.



**Abbildung 4.5:** Wechselrichter [7]

Gemäss Datenblatt lassen sich Ströme bis 200A regeln. Der Wechselrichter hat einen netzunabhängigen Energiespeicher (Batterie-Backup). Um die Daten des Wechselrichters weiterzuleiten stehen verschiedenen Kommunikationsmittel zur Verfügung. Die Informationen können über einen USB Port, RS-232 oder den SNMP (Simple Network Management Protocol) Überwachungssoftware für Echtzeitstatusanzeige und -steuerung übermittelt werden. Die Kosten des Wechselrichters belaufen sich auf 3'401Fr.

## Kontrollsystem

Das Kontrollsystem steuert und überwacht die Anlage und ist wie folgt aufgebaut: Auf einem PC ist eine C# Software installiert. Das Programm kommuniziert über ModbusTCP mit der SPS und kann die Anlage so steuern. In der Abbildung 4.6 SPS von Beckhoff [8] ist die SPS von Beckhoff ersichtlich.



Abbildung 4.6: SPS von Beckhoff [8]

In der Software kann über eine grafische Oberfläche ein Benutzer einfach auf die Anlage zugreifen, steuern und Informationen ablesen. Das Programm hat zwei verschiedene Modi. Einen manuellen Modus und einen Betriebsmodus. Im manuellen Modus kann der Betrieb der Anlage für Wartungsarbeiten angepasst werden. So können die Ventile einzeln oder blockweise geschaltet werden. Im Betriebsmodus werden nur im Störfall die Ventile automatisch geschaltet, um die Sicherheit zu gewährleisten. Wenn möglich werden nur einzelne Blöcke deaktiviert, damit die Anlage weiterhin Strom produzieren kann. In beiden Modi wird die Stromgewinnung überwacht. So wird angezeigt, welcher Generator gerade wie viel Strom erzeugt. Der Wechselrichter, der unter Wechselrichter für Netzeinspeisung beschrieben ist, kann über einem USB-Port eine serielle Kommunikation mit dem PC aufbauen. Das Programm kann die Informationen der aktuellen Energiegewinnung über diese Schnittstelle auslesen, speichert diese in einem Log-File und gibt diese an die Benutzeroberfläche weiter. Die gesammelten Daten können im Programm ausgewertet und grafisch dargestellt werden. Für dieses Kontrollsystem werden folgende Komponenten benötigt.

Anzahl	Komponente	Bezeichnung	Stückpreis [CHF]	Gesamtpreis [CHF]
1	Kontrollklemme	BK9050	200	200
20	Digitale Ausgangsklemme	KL1114	100	2000
20	Digitale Eingangsklemme	KL2134	100	2000
7	Analoge Eingangsklemme	KL2134	100	700
1	PC	Dell	1000	1000

Tabelle 4.4: Kostentabelle für Kontrollsystem

Die Kosten für die Komponenten betragen 5900 Fr [8]. Für die Entwicklung der Software werden 3 PM benötigt, was einmalig 48'000Fr kostet.

## 4.2 Mechanik

### Rohrkette

In der Industrie werden Rohrkettenförderer für den Transport von Schuttgüter verwendet. In der Abbildung 4.7 Innenaufbau Rohrkettenförderer [9] ist der Innenaufbau eines solchen Rohrkettenförderers ersichtlich.

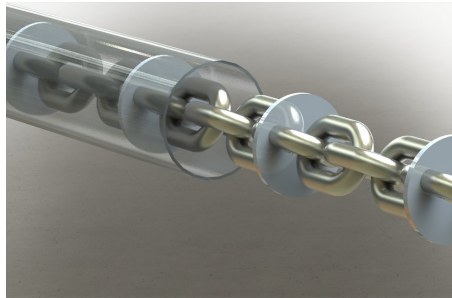


Abbildung 4.7: Innenaufbau Rohrkettenförderer [9]

Wir wollen keinen Schutt nach oben befördern, daher muss dieses System auf unsere Anforderungen angepasst werden. Diese Anforderungen sind, dass die verwendeten Materialien Robust gegenüber Korrosion sind, da das Abwasser aggressiv auf diese wirkt. Weiter müssen, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, die Platten mit möglichst kleinem Spielraum zur Aussenwand konstruiert werden, damit das Wasser nicht einfach auf der Seite herunterfliessen kann und gleichzeitig nicht eine zu grosse Reibung erzeugt wird. Die Drehachse, an dem der Generator angeschlossen wird, ist ein Stösselkettenrad. Dieses ist in der Abbildung 4.8 Stösselkettenrad [10] zu sehen



Abbildung 4.8: Stösselkettenrad [10]

Um diesen Wasserlift zu bauen, beauftragen wir die Firma Schrage, ein führender Spezialist für Rohrketten, die in Deutschland zu Hause ist. Die Kosten belaufen sich für die 60.08m Höhendifferenz auf ca. 10'000Fr pro Lift und für die 80.24m Höhendifferenz auf ca. 13'000Fr. Insgesamt würde die Anlage mit den Rohrketten, Rohr und Stösselkettenrad ca. 63'000Fr kosten. [10]

### Getriebe

Da der Generator eine viel höhere Drehzahl benötigt, als das der Lift zur Verfügung stellt, muss ein Getriebe verwendet werden. Doch um dieses zu dimensionieren, muss man zuerst wissen, wie schnell sich der Wasserlift überhaupt bewegt. Dies ist abhängig von der Wassermenge und vom Rohrdurchmesser. Das Modellhochhaus hat 76 bewohnte Stockwerke mit je fünf Bewohnern, die durchschnittlich 314 Liter Wasser am Tag verbrauchen. Die Gesamtwassermenge beträgt also  $76 * 5 * 314 = 119320 \text{ l}/24 \text{ h}$ , die vollständig durch den untersten Wasserlift abfließt. Anhand der Tagesgangkurve (siehe Abbildung 4.2) kann man ablesen, dass 15% des Abwassers zwischen 7 und 8 Uhr morgens abgelassen wird. Dies entspricht einer Abwassermenge von  $119320 * 0.15 = 17898 \text{ l}$ , etwa  $18 \text{ m}^3$ , die innerhalb einer Stunde durch den untersten Wasserlift muss. Aus den Tabellen zu den Fördermengen von Schrage (Siehe Abbildung 4.9) kann man nun ablesen, bei welchem Rohrdurchmesser welche Geschwindigkeit nötig ist, um diese 18 Kubikmeter Abwasser zu befördern.

Typ 115									
Q (m <sup>3</sup> /h)	1,25	2,00	2,65	4,00	5,50	7,00	8,75	10,60	
P (kW)	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00	4,00	4,00	5,50	
V (m/s)	0,06	0,09	0,13	0,19	0,26	0,33	0,42	0,51	
n (1/min)	3,20	5,40	7,30	11,00	15,00	19,00	24,00	29,00	
Typ 135									
Q (m <sup>3</sup> /h)	2,30	3,65	4,90	7,40	10,10	12,75	16,10	19,45	
P (kW)	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00	4,00	4,00	5,50	
V (m/s)	0,06	0,09	0,13	0,19	0,26	0,33	0,42	0,51	
n (1/min)	3,20	5,40	7,30	11,00	15,00	19,00	24,00	29,00	
Typ 160									
Q (m <sup>3</sup> /h)	1,10	2,30	4,00	5,20	8,50	11,20	14,70	19,00	25,30
P (kW)	0,55	0,75	1,50	2,20	2,20	4,00	4,00	5,50	7,50
V (m/s)	0,02	0,04	0,07	0,09	0,15	0,20	0,26	0,33	0,37
n (1/min)	1,00	2,00	3,30	4,20	7,00	9,20	12,00	15,00	21,00
Typ 200									
Q (m <sup>3</sup> /h)	1,80	3,70	6,40	8,20	13,50	17,90	23,40	30,10	33,40
P (kW)	0,55	0,75	1,50	2,20	2,20	4,00	4,00	5,50	5,50
V (m/s)	0,02	0,04	0,07	0,09	0,15	0,20	0,26	0,33	0,37
n (1/min)	1,00	2,00	3,30	4,20	7,00	9,20	12,00	15,00	17,00
Typ 270									
Q (m <sup>3</sup> /h)	14,60	33,30	45,10	61,60	80,80*				
P (kW)	3,00	5,50	7,50	11,00	15,00*				
V (m/s)	0,10	0,22	0,30	0,41	0,54*				
n (1/min)	3,60	8,30	11,00	16,00	21,00*				

Abbildung 4.9: Fördermengen [10]

Um etwas Reserve zu haben, falls einmal eine grössere Abwasserspitze auftritt, sollte das Rohr einen Durchmesser von mindestens 160mm haben. Bei  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem Rohrdurchmesser von 160mm hat die Förderkette also eine Geschwindigkeit von etwa  $0.3 \text{ m/s}$ . Bei diesem Rohrdurchmesser hat das Stösselkettenrad einen Durchmesser von etwa 400mm[10] und einen Umfang von  $400 \text{ mm} * \pi = 1257 \text{ mm} = 1.257 \text{ m}$ . Somit hat das Stösselkettenrad eine Drehzahl von  $1.257 \text{ m} * 0.3 \text{ m/s} * 60 \text{ s} = 22,6 \text{ U/min}$ . Aufgrund der kleinen Drehzahl aber relativ grossen Leistung von maximal 2300W hat der Wasserlift ein relativ hohes Drehmoment von  $2300 / (2 * \pi * 22.6 / 60) = 972 \text{ N/m}$ . Der Generator hat eine maximale Drehzahl von  $1800 \text{ U/min}$ ,

Anforderung	Wert
Übersetzungsverhältnis	1:80
Leistung	$\geq 3kW$
Eingangsdrehzahl	$22.6U/min$
Eingangsdrehmoment	$\geq 1000Nm$
Ausgangsdrehzahl	$1800U/min$
Ausgangsdrehmoment	$\geq 20Nm$

**Tabelle 4.5:** Anforderungen an das Getriebe

braucht aber nur wenig Drehmoment. Das Getriebe muss also die Drehzahl des Liftes erhöhen, dabei ist das nötige Übersetzungsverhältnis etwa 1:80. Es wurden Anfragen an mehrere mögliche Hersteller gesendet, allerdings bislang ohne Antwort. Wir schätzen den Preis pro Getriebe auf 1000.- Franken, also insgesamt 6000.- Franken.

### Umleitventil

Da wir für Störungsfälle eine Falleitung eingeplant haben, muss in jeder Etage ein Umleitungsventil installiert werden. Das Modell 167 PVC-U von GF Piping Systems, das in der Grafik 4.10 zu sehen ist, ist optimal für diese Bedingung geeignet. Die integrierte Steuerung kann von einer Spannung von 24V angesteuert werden. Somit können wir es im SPS System integrieren. Pro Umleitventil rechnen wir mit 100CHF.

**Abbildung 4.10:** Ventil [11]

## 5 Wirtschaftlichkeit

In diesem Abschnitt berechnen wir anhand grober Schätzungen die Wirtschaftlichkeit unseres Systems. Als Indikator für die Wirtschaftlichkeit wird die Amortisationszeit verwendet.

### 5.1 Annahmen

Für die Vereinfachung der Amortisationsrechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Das Hochhaus wird neu gebaut, deshalb entstehen keine Umbaukosten.
- Als Investitionskosten zählen wir die Einbaukosten der zusätzlichen Infrastruktur, die Materialkosten und die Entwicklungskosten.
- Pro Jahr entsteht ein Service- und Reperaturaufwand in der Höhe von schätzungsweise 1'000 CHF.
- Die Einbaukosten der zusätzlichen Infrastruktur betragen etwa 10'000 CHF.
- Es steht keine Wohnung leer.
- Der Wasserverbrauch ist konstant.

### 5.2 Kosten

Kostenkategorie	Anzahl	Preis[CHF]/Element	Preis[CHF]
<b>Einbaukosten</b>			<b>10'000</b>
Einbau zus. Infrastruktur	1	10'000	10'000
<b>Materialkosten</b>			<b>88'160</b>
<i>Mechanik</i>			69'000
Rohrkette 60.08m	5	10'000	50'000
Rohrkette 80.24m	1	13'000	13'000
Getriebe	6	1000	6'000
<i>Elektrotechnik</i>			11'760
Generator	6	110	660
Gleichrichter	6	300	1'800
Wechselrichter	1	3'401	3'401
Kontrollsystem	1	5900	5900
<i>Abwassertechnik</i>			7'400
Umleitventil	74	100	7'400
<b>Entwicklungskosten</b>			<b>48'000</b>
Software	1	48'000	48'000
<b>Gesamt</b>			<b>146'160</b>

**Tabelle 5.1:** Kostentabelle

### 5.3 Amortisationszeit

Mit der Formel  $A = \frac{K}{R}$  wird nun die Amortisationszeit (A) berechnet, wobei K die einmaligen Investitionskosten sind, die man aus der Tabelle 5.1 entnehmen kann. R ist der jährliche Rückfluss, also in unserem Fall der Ertrag aus dem Stromgewinn abzüglich des Service- und Reperaturaufwands.

$$K = 146'160 \text{ CHF}$$

$$R = 365 \frac{T}{J} \cdot 10.62 \frac{\text{CHF}}{T} - 1'000 \frac{\text{CHF}}{J} = 2'876 \frac{\text{CHF}}{J}$$

$$A = \frac{146'160 \text{ CHF}}{2'876 \frac{\text{CHF}}{J}} = 50.82 J$$

Trotz Verwendung optimistisch geschätzter Werte braucht es 51 Jahre, bis die Investitionskosten amortisiert sind. In der Regel sind z.B. Solaranlagen nach 9-15 Jahren amortisiert bei einer Lebensdauer von 30 Jahren [12]. Für unser System wären 10-15 Jahre Amortisationszeit wünschenswert gewesen, aber nicht realisierbar. Angenommen das System würde ein zweites Mal eingebaut, könnten die Entwicklungskosten für die Software, also 48'000 CHF, gespart werden. Aber auch dann wäre das System erst nach 30 Jahren amortisiert. Unser System ist also unwirtschaftlich.

## 6 Projektvereinbarung

### Auftraggeber

Jenni, Prof. Dr. Felix

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

### Projektleiter

Imhof, Frank

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



## References

- [1] Cheryl A. Dieter and Molly A. Maupin, „Public Supply and Domestic Water Use in the United States, 2015“, *Science for a changing world*, 2017. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/of/2017/1131/ofr20171131.pdf>.
- [2] 432 Park Avenue. (2018), [Online]. Available: <https://www.432parkavenue.com/> (visited on Dec. 1, 2018).
- [3] Projektgruppe 4, 1. Semester, FHNW 2018, „V1.0 Recherchedokument Gruppe 4“, 2018.
- [4] S. Buchberger, T. Omaghomi, T. Wolfe, J. Hewitt, and D. Cole. (Nov. 13, 2015). Peak Water Demand Study, [Online]. Available: <http://www.iapmo.org/WEStand/Documents/Peak%20Water%20Demand%20Study%20-%20Executive%20Summary.pdf> (visited on Nov. 29, 2018).
- [5] Eastern Lion. (2018). STC-3 3kw 3.75kva Brush Alternator generator, [Online]. Available: [https://dfxs.en.alibaba.com/product/60755118700-806197367/STC\\_3\\_3kw\\_3\\_75kva\\_Brush\\_Alternator\\_generator\\_eastern\\_lion.html](https://dfxs.en.alibaba.com/product/60755118700-806197367/STC_3_3kw_3_75kva_Brush_Alternator_generator_eastern_lion.html) (visited on Dec. 1, 2018).
- [6] Setec. (2018). SET4850 AC DC rectifier, [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/SET4850-AC-DC-rectifier\\_60351527841.html](https://www.alibaba.com/product-detail/SET4850-AC-DC-rectifier_60351527841.html).
- [7] Voltacon. (), [Online]. Available: <https://voltaconsolar.com/hybrid-solar-inverter-10kw-three-phase-48v.html> (visited on Dec. 1, 2018).
- [8] Beckhoff. (2018), [Online]. Available: <https://www.beckhoff.de> (visited on Dec. 1, 2018).
- [9] ABConvey. (), [Online]. Available: <https://www.abconvey.com> (visited on Dec. 1, 2018).
- [10] Schrage Rohrkettensystem GmbH. (2018), [Online]. Available: <https://www.schrage.de> (visited on Dec. 1, 2018).
- [11] GF Piping Systems. (2018). 167 PVC-U, [Online]. Available: [https://www.gfps.com/appgate/ecat/common\\_flow/10006F/CH/de/109564/721624/721636/P420683/product.html](https://www.gfps.com/appgate/ecat/common_flow/10006F/CH/de/109564/721624/721636/P420683/product.html) (visited on Dec. 5, 2018).
- [12] Helion. (2018). Amortisation einer Solaranlage, [Online]. Available: <https://www.helion.ch/solaranlage/amortisation/>.

7 Anhang

7.1 Energieberechnung Grobkonzept 1

Pro Tag	E in MJ
Gewichtskraft g [m/s²]:	9.81
Wasser pro Person [l]	314
Dichte p [Kg/m³]	1000
Personen pro benutzte Etage	5
Wasser pro Etage [l]	1570
Wasser pro Block 2-6 [l]	18'840
Wasser pro Block 1 [l]	25'120
Wassergeschwindigkeit 2 Etagen [m/s]	8.5
Wassergeschwindigkeit 1 Etage [m/s]	6.5
Etagenhöhe [m]	4.72
Wirkungsgrad	0.80
Abstand Turbine [m]	9.44
Stromkosten 1 kWh [CHF]	0.20

Block 6	$\sum_{n=0}^5 0.5 \times 1570 (n \times 2) \times 8.5^2 + 6 (0.5 \times 1570 \times 8.5^2 + 0.5 \times 1570 \times 6.5^2) + 0.5 \times 18840 \times 8.5^2$	2.92
Block 5	$\sum_{n=0}^5 0.5 \times 1570 (n \times 2) \times 8.5^2 + 6 (0.5 \times 1570 \times 8.5^2 + 0.5 \times 1570 \times 6.5^2) + 0.5 \times 18840 \times 8.5^2 + 7 (0.5 \times 18840 \times 8.5^2)$	7.69
Block 4	$\sum_{n=0}^5 0.5 \times 1570 (n \times 2) \times 8.5^2 + 6 (0.5 \times 1570 \times 8.5^2 + 0.5 \times 1570 \times 6.5^2) + 0.5 \times 18840 \times 8.5^2 + 7 (0.5 \times 2 \times 18840 \times 8.5^2)$	12.45
Block 3	$\sum_{n=0}^5 0.5 \times 1570 (n \times 2) \times 8.5^2 + 6 (0.5 \times 1570 \times 8.5^2 + 0.5 \times 1570 \times 6.5^2) + 0.5 \times 18840 \times 8.5^2 + 7 (0.5 \times 3 \times 18840 \times 8.5^2)$	17.21
Block 2	$\sum_{n=0}^5 0.5 \times 1570 (n \times 2) \times 8.5^2 + 6 (0.5 \times 1570 \times 8.5^2 + 0.5 \times 1570 \times 6.5^2) + 0.5 \times 18840 \times 8.5^2 + 7 (0.5 \times 4 \times 18840 \times 8.5^2)$	21.98
Block 1	$\sum_{n=0}^7 0.5 \times 1570 (n \times 2) \times 8.5^2 + 8 (0.5 \times 1570 \times 8.5^2 + 0.5 \times 1570 \times 6.5^2) + 9 (0.5 \times 5 \times 18840 \times 8.5^2)$	34.52
Total		96.77
Total mit Wirkungsgrad		77.41

Leistung [kWh]	21.50
Ersparnis pro Tag [Fr]	4.30

Abbildung 7.1: Berechnung Grobkonzept 1

## 7.2 Energieberechnung Grobkonzept 2

Pro Tag		E in MJ
Gewichtskraft $g$ [ $m/s^2$ ]:	9.81	Block 6 gesamt 64.55
Wasser pro Person [l]	314	Block 5 gesamt 52.34
Dichte $\rho$ [ $kg/m^3$ ]	1000	Block 4 gesamt 40.13
Personen pro benutzte Etage	5	Block 3 gesamt 27.92
Wasser pro Etage [l]	1570	Block 2 gesamt 15.70
Wasser pro Block 2-6 [l]	18'840	Block 1 gesamt 0.00
Wasser pro Block 1 [l]	25'120	Total 200.64
Etagenhöhe [m]	4.72	Total mit Wirkungsgrad 160.51
Benutzte Etagen Block 1	16	
Benutzte Etagen pro Block 2-6	12	
Wirkungsgrad	0.80	
Abstand Turbine [m]	9.44	
Stromkosten 1 kWh [CHF]	0.20	

Leistung [kWh]	44.59
Ersparnis pro Tag [Fr]	8.92

Abbildung 7.2: Berechnung Grobkonzept 2

## 7.3 Energieberechnung Grobkonzept 3

Pro Tag		E in MJ
Gewichtskraft $g$ [ $m/s^2$ ]:	9.81	Block 6 gesamt 11.34
Wasser pro Person [l]	314	Block 5 gesamt 22.68
Dichte $\rho$ [ $kg/m^3$ ]	1000	Block 4 gesamt 34.02
Personen pro benutzte Etage	5	Block 3 gesamt 45.36
Wasser pro Etage [l]	1570	Block 2 gesamt 78.51
Wasser pro Block 2-6 [l]	18'840	Block 1 gesamt 0.00
Wasser pro Block 1 [l]	25'120	Total 191.92
Etagenhöhe [m]	4.72	Total mit Wirkungsgrad 153.53
Benutzte Etagen Block 1	16	
Benutzte Etagen pro Block 2-6	12	
Wirkungsgrad	0.80	
Abstand Turbine [m]	9.44	
Stromkosten 1 kWh [CHF]	0.20	

Leistung [kWh]	42.65
Ersparnis pro Tag [Fr]	8.53

Abbildung 7.3: Berechnung Grobkonzept 3

## 7.4 Energieberechnung Grobkonzept 4

Pro Tag			E in MJ		E in MJ		E in MJ
Gewichtskraft g [m/s <sup>2</sup> ):	9.81	Block 2-6	0.95	Block 1	1.16	Block 6 gesamt	70.22
Wasser pro Person [l]	314		0.87		1.09	Block 5 gesamt	58.01
Dichte p [Kg/m <sup>3</sup> ]	1000		0.80		1.02	Block 4 gesamt	45.80
Personen pro benutzte Etage	5		0.73		0.95	Block 3 gesamt	33.59
Etagenhöhe [m]	4.72		0.65		0.87	Block 2 gesamt	21.37
Wirkungsgrad	0.80		0.58		0.80	Block 1 gesamt	9.89
Blockhöhe 2-6 [m]	66.08		0.51		0.73	Total	238.88
Blockhöhe 1 [m]	80.24		0.44		0.65	Total mit	
Höhe gesamt bis Kanilisation	410.64		0.36		0.58	Wirkungsgrad	191.10
Stromkosten 1 kWh [CHF]	0.20		0.29		0.51		
			0.22		0.44		
			0.15		0.36		
		Pro Block	6.54		0.29	Leistung [kWh]	53.08
					0.22	Ersparnis pro Tag [Fr]	10.62
					0.15		
					0.07		
				Block 1	9.89		

Abbildung 7.4: Berechnung Grobkonzept 4

## 7.5 Vereinfachtes Modell

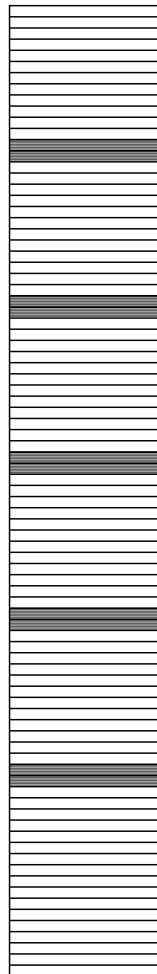


Abbildung 7.5: Vereinfachtes Modell