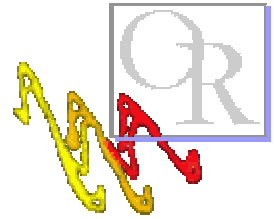




TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY



Wasserkraftwerke

Bakkalaureatsarbeit im Rahmen von:
Operations Research 1 PR

LVA-Leiter:
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander MEHLMANN

Helmut PETRITSCH

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|---|
| 1 | Beschreibung des Projekts im Rahmen von OR..... | 3 |
| 1.1 | Ziel & Aufgabenstellung..... | 3 |
| 1.2 | Das Modell | 3 |
| 1.2.1 | Die (quadratische) Zielfunktion: | 3 |
| 1.2.2 | Nebenbedingungen / Constraints: | 4 |
| 1.3 | Erklärung der Variablen..... | 5 |
| 1.4 | Parametrisierung über MS Excel | 5 |
| 2 | Resümee | 8 |

1 Beschreibung des Projekts im Rahmen von OR

1.1 Ziel & Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war es, ein möglichst universelles Programm für die Optimierung von Kraftwerkketten zu erstellen. Die Implementierung erfolgt mit Hilfe von MatLab, als Lösungsalgorithmus wurde quadprog, ein bereits in MatLab implementierter Algorithmus für quadratische Zielfunktionen und lineare Nebenbedingungen, verwendet.

Aus der Matlab Hilfe:

Solve the quadratic programming problem

$$\min_x \frac{1}{2}x^T Hx + f^T x \quad \text{such that} \quad \begin{aligned} A \cdot x &\leq b \\ Aeq \cdot x &= beq \\ lb &\leq x \leq ub \end{aligned}$$

where H , A , and Aeq are matrices, and f , b , beq , lb , ub , and x are vectors

Das Programm kann sowohl für Laufkraftwerke mit geringem Stauvermögen als auch für Stauketten herangezogen werden. Die Möglichkeit eines Pumpbetriebes bzw. ein Teuerungsfaktor des Einkaufs (für den Pumpbetrieb) von Strom gegenüber dem Verkauf kann über einen allgemeinen Faktor realisiert werden.

Die Parameter werden wegen besserer Übersicht über ein Excel File eingelesen (siehe 3.4 Parametrisierung über MS Excel)

1.2 Das Modell

1.2.1 Die (quadratische) Zielfunktion:

Maximiere die Summe über die Zeit von dem Produkt aus Preis pro Leistung mal erzeugter Leistung – verbrauchter Leistung:

$$\max \sum_t P_t \sum_k P_{t_k} + \bar{P}_{t_k}$$

$$P_{t_k} \geq 0, \quad \bar{P}_{t_k} \leq 0$$

wobei

$$1. \quad P_{t_k} = g * \eta_k * \tilde{H}_{t_k} * Q_{t_k} * hC$$

Die Leistung des Kraftwerks k zum Zeitpunkt t ergibt sich aus dem Produkt von Erdgravitation, Wirkungsgrad der Turbinen in Kraftwerk k , relevanter Höhendifferenz, in Leistung zu verwandelnder Wassermenge mal einer Zeitkonstante (die Berechnungen basieren auf Sekundenbasis; soll in Stundenschritten optimiert werden ist hC mit einem Wert von 3600 zu initiieren).

$$2. \bar{P}_k = g * \frac{1}{\bar{\eta}_k} * \bar{H}_{t_k} * \bar{Q}_{t_k} * hC$$

Die verbrauchte Leistung des Kraftwerks k zum Zeitpunkt t für Pumpbetrieb ergibt sich aus dem Produkt von Erdgravitation, dem Kehrwerts des Wirkungsgrades der Pumpen in Kraftwerk k, relevanter Höhendifferenz für Pumpbetrieb, der geförderten Wassermenge mal einer Zeitkonstante.

$$3. \tilde{H}_{t_k} = H_{t_k} - H_{t_{k+1}} - H_{v_k} \text{ bzw. } \tilde{H}_{t_k} = H_{t_k} - H_t - H_{v_k}$$

Die relevante Höhendifferenz für die Turbinen des Kraftwerks k zum Zeitpunkt t ergeben sich aus Stauhöhe von Kraftwerk k zum Zeitpunkt t minus Stauhöhe von Kraftwerk k+1 (Unterlieger) zum Zeitpunkt t bzw. Höhe der Turbine minus dem Höhenverlust

$$4. \bar{\tilde{H}}_{t_k} = H_{t_k} - H_{t_{k+1}} + \bar{H}_{v_k} \text{ bzw. } \bar{\tilde{H}}_{t_k} = H_{t_k} - H_t + \bar{H}_{v_k}$$

Die relevante Höhendifferenz für die Pumpen des Kraftwerks k zum Zeitpunkt t ergeben sich aus Stauhöhe von Kraftwerk k zum Zeitpunkt t minus Stauhöhe von Kraftwerk k+1 (Unterlieger) zum Zeitpunkt t bzw. Höhe der Pumpe plus einem für das Pumpen relevanten Höhenverlust.

Damit ergibt sich

$$H_{t_k} = H_{t-1_k} + \frac{Q_{1_{k-1}} * hC}{a} + \frac{\bar{Q}_{t-1_{k-1}} * hC}{a} - \frac{Q_{t-1_k} * hC}{a} - \frac{\bar{Q}_{t-1_k} * hC}{a}$$

unter der Voraussetzung dass $H_{1_k} = H_{0_k}$ ergibt sich weiter

$$H_{2_k} = H_{0_k} + \frac{Q_{1_{k-1}} * hC}{a} + \frac{\bar{Q}_{1_{k-1}} * hC}{a} - \frac{Q_{1_k} * hC}{a} - \frac{\bar{Q}_{1_k} * hC}{a}$$

Mittels rekursiven Einsetzens lässt sich die Zielfunktion berechnen.

1.2.2 Nebenbedingungen / Constraints:

- Die Summe des Outputs in Kraftwerk k darf eine maximale Summe (Summe der Zuflüsse + festzulegende Größe) nicht überschreiten
- Die einzelnen Kraftwerke dürfen am Ende der Optimierung eine maximale Summe an Output (Summe der Zuflüsse + festzulegende Größe) nicht überschreiten, wobei Summe der Zuflüsse im ersten Kraftwerk der „statische“ Zufluss in die Kette ist, bei den restlichen Kraftwerken der Zufluss aus dem Abfluss der Oberlieger resultiert.
- Die Kraftwerke dürfen nur eine maximale Stauhöhe erreichen
- Die Kraftwerke dürfen eine minimale Stauhöhe nicht unterschreiten
- Q_{t_k} , \bar{Q}_{t_k} darf sich nur im Bereich der Minimal- bzw. Maximalauslastung der Turbinen / der Pumpen bewegen.

1.3 Erklärung der Variablen

- Q_{t_k} Entscheidungsvariablen: Wasser von Kraftwerk k zum Zeitpunkt t für Stromproduktion
- \bar{Q}_{t_k} Entscheidungsvariablen: Wasser das Kraftwerk k zum Zeitpunkt t gepumpt wird
- p_t die Preise des Stroms zum Zeitpunkt t
- P_{t_k} die Leistung (Power) des Kraftwerks k zum Zeitpunkt t
- \bar{P}_{t_k} die Pumpleistung des Kraftwerks k zum Zeitpunkt t.
- g die Erdgravitation
- η_k Der Wirkungsgrad von Kraftwerk k
- $\bar{\eta}_k$ Der Wirkungsgrad für den Pumpbetrieb von Kraftwerk k
- hC Die Zeitkonstante mit der gerechnet wird; stundenweise Optimierung
 $hC = 3600 (60*60)$
- H_{t_k} Pegelhöhe von Kraftwerk k zum Zeitpunkt t
- H_{v_k} Verlustleistung von Kraftwerk k
- \bar{H}_{v_k} Verlustleistung von Kraftwerk k bei Pumpbetrieb
- \tilde{H}_{t_k} relevanter Höhenunterschied für die Stromerzeugung
- $\tilde{\bar{H}}_{t_k}$ relevanter Höhenunterschied für Pumpbetrieb

1.4 Parametrisierung über MS Excel

Folgende Parameter können angegeben werden:

Mindestpegel Seehöhe:

Gibt den Pegelstand des Kraftwerks an, der mindestens erhalten bleiben muss (aus Gründen der Statik, weil der Stausee als Ausflugsziel für Touristen genutzt wird, etc.). Angabe in Meter über Seehöhe.

Höchstpegel Seehöhe:

Gibt den Pegelstand des Kraftwerks an, der maximal erreicht werden – ergibt sich üblicherweise aus der Höhe der Staumauer. Ebenfalls Angabe in Meter über Seehöhe.

Höhenverlust:

Gibt jenen Verlust in Metern an, der durch Rohrleitungs-, Reibungs- und ähnliche Verluste entsteht. Diese Angabe wird von der bestehenden Differenz zwischen Pegelstand Kraftwerk – wirksamer unterer Pegel (Pegelhöhe Unterlieger oder Seehöhe Turbine) abgezogen. Geringere Höhe bedeutet geringer Leistung. Von einer in Beziehung Setzung von Höhenverlust und Leistung (je mehr Wasser durch die Rohre geleitet wird, desto größer sind die entstehenden Reibungsverluste) wurde der

Einfachheit halber abgesehen. Die effektiven Auswirkungen sind zu gering, um das sich damit verkomplizierende Modell und vor allem die damit steigende Berechnungsdauer zu rechtfertigen.

Höhenverlust bei Pumpbetrieb:

Äquivalent zu Höhenverlust für Pumpbetrieb. Üblicherweise können beide als gleich eingestuft werden: Auch beim Pumpen verursachen diverse Verluste die Effizienz des Turbinen – beim Pumpen.

Parameter für lineare Approximation des Volumens:

Betreffend den Stausee wird mit zwei verschiedenen Größen gerechnet. Für momentane Völle des Stausees wird ein Maß in Meter, die Wasseroberfläche über Meer herangezogen. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit, dass das Gefälle des Wassers für den Output aus den Turbinen für die Zielfunktion benötigt wird.

Auf der anderen Seite wird der Zulauf bzw. der „Verbrauch“ der Turbinen in m^3 angegeben. Um die beiden Größen zusammenführen, muss (wiederum der Einfachheit halber) ein linearer Zusammenhang zwischen im Stausee enthaltenen Volumen und Stauhöhe hergestellt werden.

Faktor, um den (Strom) Einkauf teurer als Verkauf:

Wiederum eine approximative Annäherung, um das Modell der „Realität“ weiter heranzuführen. Für gewöhnlich ist der Ankauf von Strom (für den Pumpbetrieb) teurer als der Verkauf. Da als Input nur die (geschätzten) Verkaufspreise zur Verfügung stehen, kann über diesen Parameter ein höherer Kauf- als Verkaufspreis simuliert. Durch eine Angabe von 1 wird der Parameter „ausgeschaltet“ – An- und Verkauf als gleich teuer gewertet.

Speicherzustand Anfang:

Beschreibt den Pegelstand der Stauseen zu Beginn des zu optimierenden Zeitrahmens.

Zufluss:

Grundsätzlich wird von der Angabe eines stündlichen Zuflusses ausgegangen – auch der Output erfolgt im Stundentakt, da auch der Strom stündlich gehandelt wird. Grundsätzlich wäre ein Umschreiben auf z.B. Tageweise oder 8 Stunden – weise des Programms kein großer Aufwand – es wurde eine derartige Möglichkeit eingeplant.

Mindestdurchfluss:

Ist bei Staukraftketten, insbesondere beim nicht letzten Kraftwerk, für gewöhnlich null. Mit diesem Parameter können einerseits Laufkraftwerke simuliert werden, andererseits hat jede Kraftkette ein letztes Kraftwerk was einen Mindestausfluss ausweisen muss.

Pumpleistung:

Manche Kraftwerke (z.B. Ottenstein, Niederösterreich, Staukraftwerk der EVN) verfügen über Pumpen, mit denen sie aus dem Unterleger während Phasen mit niedrigem Strompreis Wasser wieder hoch pumpen können.

Max. Durchfluss:

Beschreibt das maximale Fassungsvermögen der Turbinen, also der maximale Output an Wasser und damit Energie.

Wirkungsgrad Turbinen/Pumpen:

Geben den Wirkungsgrad der Turbinen und der Pumpen an.

Max.Abgabe gesamt – Zufluss:

Gibt in m^3 an, wie viel Wasser jedes Kraftwerk nach Ende der Optimierung „verlieren“ werden darf. Dieser Parameter wird für die Constraints verwendet, um zu verhindern, dass dahingehend optimiert wird, einfach möglichst alles nach unten hinaus zulassen, aber trotzdem kontrollierte Pegelschwankungen zu ermöglichen. Dies wird z.B. für kontrolliertes Absinken des Pegels vor der Schneeschmelze benötigt.

Seehöhe Turbine / Turbine als Unterleger:

Gibt die Seehöhe der Turbine an bzw. ob diese Höhe für die Berechnung der relevanten Höhendifferenz herangezogen werden soll.

Max Abgabe gesamt – Zufluss: Kette:

Siehe Max.Abgabe gesamt – Zufluss: Gibt an, wie viel m^3 Wasser die gesamte Staukette nach Ende der Optimierung „verlieren“ darf.

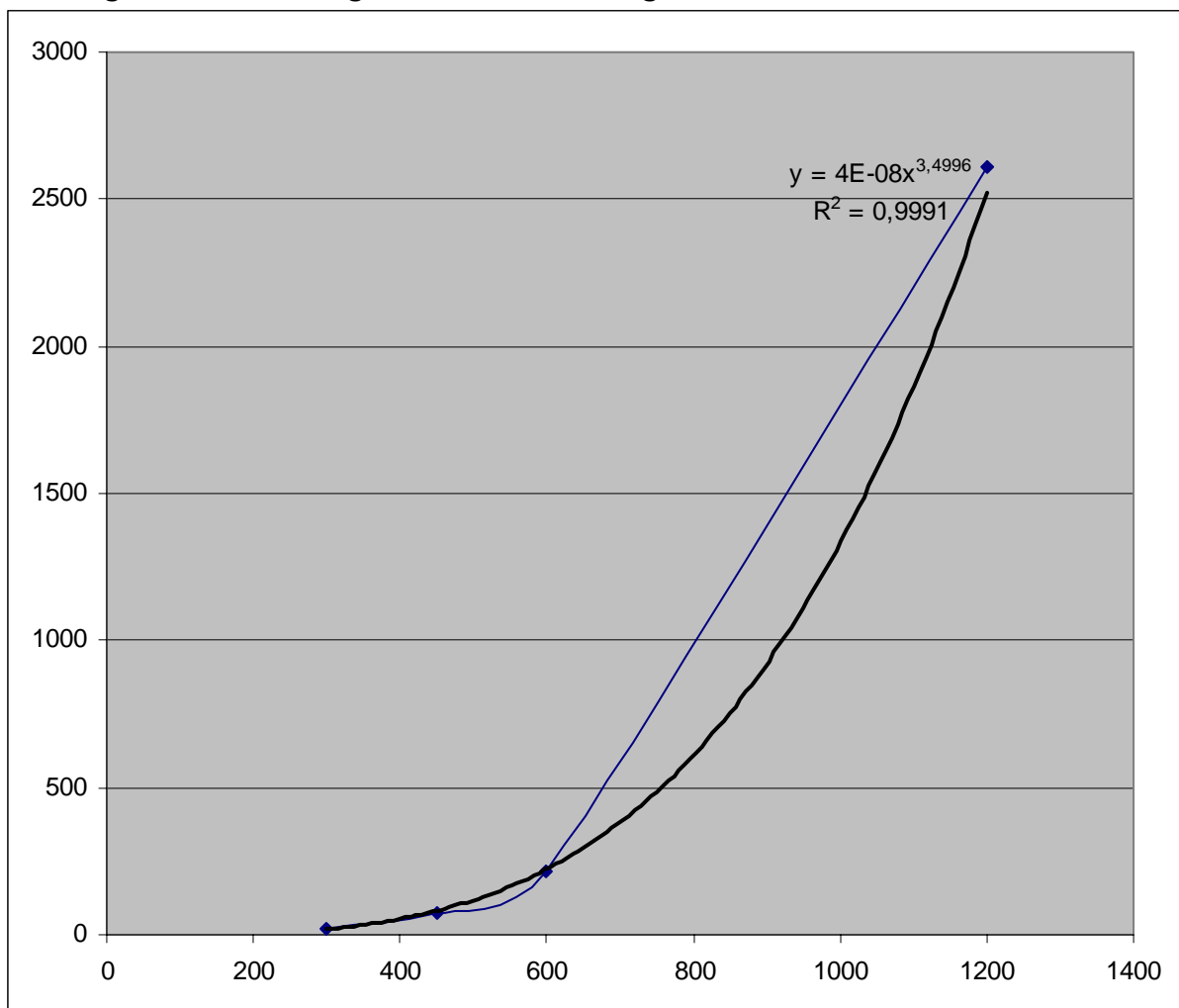
Strompreis:

Gibt die Strompreise an, für den die Optimierung durchgeführt werden soll.

2 Resümee

Dieses Projekt gab einen guten Einblick in die Möglichkeiten von Operations-Research. Es zeigte aber auch, dass es nicht immer einfach ist, ein sinnvolles Modell zu finden bzw. den richtigen Mittelweg aus den konkurrierenden Anforderungen ein einfaches und (für die Berechnung) schnelles Modell zu finden und gleichzeitig die Realität in ein möglichst naturgetreues Modell einzufangen.

Trotz einer relativ starken Reduktion der Komplexität konnte festgestellt werden, dass die Lösung Probleme dieser Art sehr rechenintensiv sind. Das Programm wurde mit unterschiedlicher Anzahl an Entscheidungsvariablen ausgeführt um die Berechnungszeit zu messen. Das Ergebnis überstieg unsere Erwartungen:



Der Algorithmus hat ein Wachstum zur 3.5 Potenz – während die Optimierung von einer Woche einen durchschnittlichen PC nur ca. 5 Minuten in Anspruch nahm (unter Annahme von 3 Kraftwerken wovon eines Pumpen kann und stündlichen Zeitschritten), würde die Optimierung eines Jahres auf demselben Rechner ca. 10 Jahre in Anspruch nehmen.