

DIE LEISTUNGSKOMPONENTE IN DER KLASSISCHEN FORMEL „SPEZIFISCHE ANNUITÄTISCHE STROMERZEUGUNGSKOSTEN“

Heinz Stigler¹, Udo Bachhiesl¹

Herleitung der „Klassischen Kostenformel der Energieumwandlung“ aus der Kapitalwertmethode bzw. der Barwertmethode

Aufgrund der Langlebigkeit der Anlagen der Energiewirtschaft sind bei Untersuchungen der Zweckmäßigkeit einer Investition jedenfalls dynamische Investitionsrechenverfahren anzuwenden.

Die Kapitalwertmethode stellt die wesentliche Methode der dynamischen Investitionsrechenverfahren dar. Die davon abgeleiteten anderen Rechenverfahren wie Methode des Internen Zinsfußes und die Annuitätenmethode stellen nur Sonderformen der Kapitalwertmethode dar.

Bei der Kapitalwertmethode werden alle Auszahlungen (also Anschaffungsauszahlung und die künftigen jährlichen Zahlungen für Brennstoff, Personal usw.) und alle Einzahlungen (also die künftigen jährlichen Zahlungen für gelieferte Energie und Leistung) auf den Bezugszeitpunkt zinseszinsmäßig abgezinst (diskontiert). Den Bezugszeitpunkt legt man zweckmäßigerweise mit dem Zeitpunkt der Investitionsentscheidung (also „jetzt“) fest.

Der Kapitalwert einer Investition entspricht dabei der Summe der aktuellen, diskontierten Werten (= Barwerten) aller Auszahlungen und Einzahlungen:

$$KW = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) \cdot \underbrace{\frac{1}{(1+i)^t}}_{BWF}$$

KW	Kapitalwert
E_t	Einzahlungen der Periode t
A_t	Auszahlungen der Periode t
i	Kalkulationszinsfuß
t	Periode (t = 0, 1, 2, 3, ...n)
n	Anzahl der Perioden (Nutzungsdauer)
BWF	„Diskontierungsfaktor“

Der „Diskontierungsfaktor“ ist jener Wert, mit dem eine künftige Auszahlung bzw. Einzahlung multipliziert werden muss, um den aktuellen, jetzigen (= „baren“) Wert der Zahlung zu erhalten.

Als Ergebnis der Kapitalwertmethode findet man eine einfache Regel für die Entscheidungsfindung, ob man eine Investition durchführen soll oder nicht: Bei einem positiven Kapitalwert verzinst sich die Investition mit dem geforderten Kalkulations-

¹ Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, 8042 Graz, Inffeldgasse 18, +43 (0)316 873 7900, Fax: +43 (0)316 873 7910; Stigler@TUGraz.at, www.iee.tugraz.at

zinsfuß und es ergibt sich ein zusätzlicher, aktueller, barer Nutzen in Höhe des Kapitalwertes (= „goodwill“). Bei einem negativen Kapitalwert verzinst sich die Investition geringer als der angelegte Kalkulationszinsfuß (entsprechend dem negativen „goodwill“).

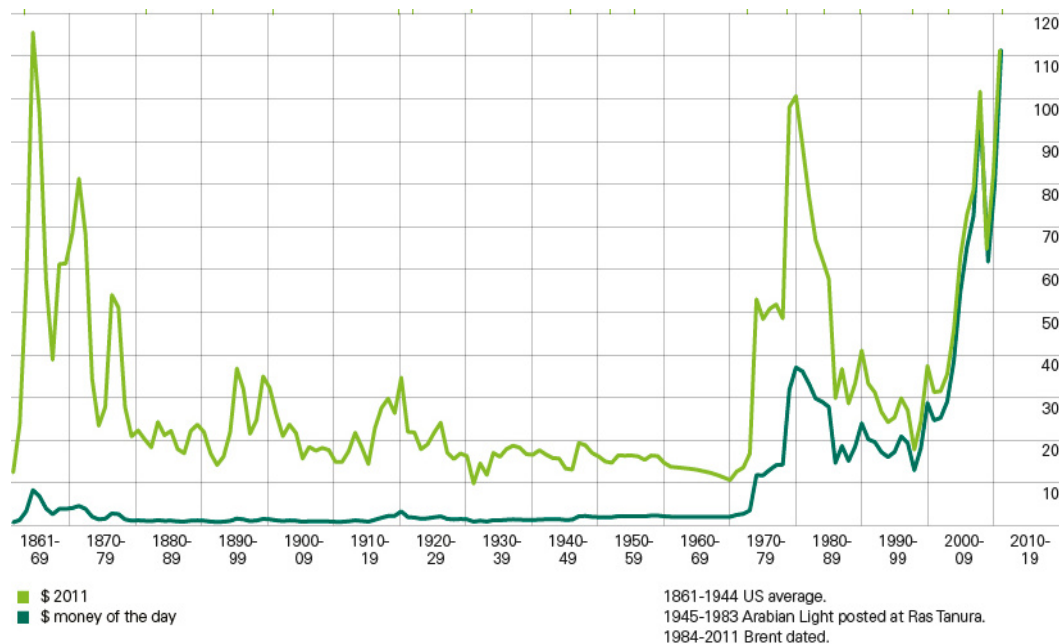
Durch entsprechende Veränderung des Kalkulationszinsfußes (Erhöhung bei einem positiven goodwill, Erniedrigung bei einem negativen goodwill) kann man so auf einfache Weise einen Kalkulationszinsfuß finden, bei dem sich ein Kapitalwert von null ergibt. Diesen Zinsfuß nennt man dann den „Internen Zinsfuß der Investition“.

Es stellt sich nun die wesentliche Frage nach der zeitlichen Entwicklung der Ein- und Auszahlungen sowie der Höhe des Kalkulationszinsfußes.

In einer angenommenen Welt ohne Inflation wird man einen Zinsfuß nehmen, der sich an der realen Wirtschaftsentwicklung orientiert (z.B. entsprechend der „Optimalen Wachstumstheorie“ in Höhe des realen Wachstums des BIP). Die wesentlichen künftigen Auszahlungen für Brennstoffe und Personalkosten werden wohl auch in realen Werten etwas wachsen. Unter Umständen wird es aber Verschiebungen zwischen der Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den einzelnen Kostenkomponenten geben, die jeweils zu berücksichtigen sind.

In einer Welt mit Inflation wird man alle Kostenkomponenten um die Inflationshöhe zu erhöhen haben und klarerweise auch die Höhe des Kalkulationszinsfußes.

Bei Anwendung der Kapitalwertmethode konnten die früheren Energiewirtschaftler einschließlich Musil zu Recht davon ausgehen, dass die variablen Bestandteile der Kapitalwertformel nominell (also einschließlich der Inflation) konstant blieben, wie anhand der Entwicklung der Primärenergiepreise und -kosten über den Zeitraum eines Jahrhunderts (1875 – 1973) dargestellt werden kann:



Qu.: BP Statistical Review of World Energy 2012; <http://www.bp.com/>

Bei Anwendung der Kapitalwertformel in ihrer nominellen Form (also mit Berücksichtigung der Inflation) nahm man also den nominellen Kalkulationszinsfuß entsprechend den nominellen Kosten für Kapital (Kosten für langfristige Kredite

einschließlich der Inflation). Weiters konnte man für die Brennstoffkosten die nominell gleich bleibenden Werte einsetzen, sodass also die Auszahlungen nominell gleich blieben.

Zusätzlich wurde eine wesentliche Annahme hinsichtlich der zu erwartenden Einzahlungen getroffen: Da man bei den Investitionsrechnungen ähnliche Kraftwerke miteinander verglich, die annahmegemäß den selben Wert für das Elektrizitätssystem lieferten, konnte man für diese Vergleiche davon ausgehen, dass die Einzahlungen aller untersuchter Alternativen die gleichen Einzahlungen aufwiesen.

Damit konnte man in der Kapitalwertmethode wesentliche Vereinfachungen treffen:

- a) Die Einzahlungen aller Alternativen sind gleich, sodass man nur mehr die baren Werte der Auszahlungen miteinander vergleichen musste: Die Alternative mit dem niedrigsten Barwert aller Auszahlungen ist die zu bevorzugende.
- b) Da annahmegemäß die Auszahlungen nominell (!) gleich blieben, konnte man wesentliche Vereinfachungen in der Kapitalwertformel erzielen, wie im Folgenden anhand der Herleitung der dann so bezeichneten „Barwertmethode“ näher gezeigt wird.

Als Zwischenergebnis halten wir fest:

- Die Kapitalwertmethode darf in ihren Komponenten entweder mit Inflation (= nominell) oder ohne Inflation (= real) angewendet werden. Eine Vermischung von realen bzw. nominellen Komponenten ist nicht zulässig.
- Bei Zu-Grunde-Legung künftig nominell gleich bleibender Kostenkomponenten – wie dies für die Brennstoffkosten bis 1973 auch zulässig war – sind auch die Kapitalkosten nominell (also einschließlich der Inflation) anzusetzen.
- Die Annahme von Einzahlungen in der selben Höhe für unterschiedliche Investitionsalternativen bedingt, dass die Ergebnisse dieser Vergleichsrechnungen nur dann zu sinnvollen Ergebnissen führen, wenn die Alternativen auch gleiche Wertigkeit im Elektrizitätssystem aufweisen. Ein Vergleich zwischen bedarfsgerechten und dargebotsabhängigen Kraftwerken ist damit nicht möglich.

Mit diesem Zwischenergebnis und den im Folgenden angeführten Annahmen ergibt sich eine verführerische Vereinfachungsmöglichkeit für die Kapitalwertformel:

- Die Einzahlungen werden weggelassen.
- Der Kapitalwert stellt demnach den baren Wert aller künftigen Auszahlungen dar. Hiervon leitet sich die Bezeichnung „Barwertmethode“ ab. Die Investitionsalternative mit dem niedrigsten (Gesamt-) Barwert ist die zu bevorzugende.
- Die (Brennstoff-) Auszahlungen sind für alle künftigen Jahre gleich hoch.
- Diese letzte Annahme – die für die angesprochene Vereinfachung wesentlich ist – bedeutete bis 1973 wohl, dass man die gefundene vereinfachende Formel nominell anwenden konnte.
- Aus heutiger Sicht kann man im günstigsten Fall davon ausgehen, dass die Energiekosten künftig bestenfalls real konstant bleiben.
- Das bedingt, dass man diese Formel nur in ihrer realen Variante – also Zinssatz und Energiekosten im Zeitverlauf real gleichbleibend – anwenden darf. Damit darf man für den Diskontierungs-Zinssatz nur den realen Wert verwenden!

Vorerst werden nur die (Brennstoff-) Auszahlungen berücksichtigt, wobei n Jahre einschließlich des Startjahres – in dem nicht abgezinst wird – berücksichtigt werden.

$$BW_{ges} = B_0 + \frac{B_0}{(1+i)^1} + \frac{B_0}{(1+i)^2} + \frac{B_0}{(1+i)^3} + \frac{B_0}{(1+i)^4} + \dots + \frac{B_0}{(1+i)^{n-1}}$$

Multipliziert man diese Gleichung mit $\frac{1}{1+i}$ so erhält man

$$\frac{BW_{ges}}{(1+i)} = \frac{B_0}{(1+i)^1} + \frac{B_0}{(1+i)^2} + \frac{B_0}{(1+i)^3} + \frac{B_0}{(1+i)^4} + \dots + \frac{B_0}{(1+i)^{n-1}} + \frac{B_0}{(1+i)^n}$$

Subtrahiert man nun die zweite Gleichung (deren rechte Glieder sinnvollerweise um eine Position nach rechts gerückt werden) von der ersten Gleichung, ergibt sich auf einfache Weise die „Summenformel der endlichen geometrischen Reihe“:

$$\begin{aligned} BW_{ges} &= B_0 + \frac{B_0}{(1+i)^1} + \frac{B_0}{(1+i)^2} + \frac{B_0}{(1+i)^3} + \frac{B_0}{(1+i)^4} + \dots + \frac{B_0}{(1+i)^{n-1}} \\ - \frac{BW_{ges}}{(1+i)} &= - \frac{B_0}{(1+i)^1} - \frac{B_0}{(1+i)^2} - \frac{B_0}{(1+i)^3} - \frac{B_0}{(1+i)^4} - \dots - \frac{B_0}{(1+i)^{n-1}} - \frac{B_0}{(1+i)^n} \\ \hline BW_{ges} - \frac{BW_{ges}}{(1+i)} &= B_0 && - \frac{B_0}{(1+i)^n} \end{aligned}$$

Als Ergebnis findet man die kompakte, einfache Formel:

$$\begin{aligned} BW_{ges} \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+i)}\right) &= B_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+i)^n}\right) \\ BW_{ges} &= B_0 \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{(1+i)^n}\right)}{\left(1 - \frac{1}{(1+i)}\right)} \end{aligned}$$

$$\frac{(1+i)^{n-1} \cdot (1+i)}{(1+i)^n \cdot ((1+i)-1)} \rightarrow \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^{n-1} \cdot i} = \beta$$

Mit dem Barwertfaktor β lässt sich demnach der Gesamt-Barwert als Summe der Barwerte aller Brennstoffauszahlungen einfach ermitteln:

$$BW_{ges} = B_0 * \beta$$

Der Barwertfaktor β stellt einen Operator dar, der in einem Arbeitsgang zwei Arbeitsschritte in einem Stück erledigt:

- a) Er diskontiert alle künftig gleich bleibenden mit dem Kalkulationszinsfuß auf den Bezugszeitpunkt (üblicherweise „jetzt“).
- b) Er addiert die Barwerte der einzelnen Zahlungen zu einem Gesamt-Barwert.

Das Verständnis dieser Funktionen des Barwertfaktors ist Voraussetzung für das Verständnis der Umkehrung des Barwertfaktors, also des Annuitätsfaktors: siehe hierzu gleich die folgende Vorgangsweise.

Der Gesamt-Barwert einer Investition ergibt sich einschließlich der Anschaffungsauszahlung A somit zu:

$$BW_{ges} = A + B_0 * \beta$$

Da es nun sinnvoll ist, Investitionen mit unterschiedlicher Lebensdauer miteinander vergleichen zu können, rechnet man die hier erhaltenen unterschiedlichen Gesamt-Barwerte der alternativen Investitionen in jährlich gleich bleibende Zahlungen um.

Hierzu dividiert man diese letzte Gleichung durch den Barwertfaktor β und erhält:

$$\frac{BW_{ges}}{\beta} = \frac{A}{\beta} + B_0$$

Führt man nun die Definition des Annuitätsfaktors $\alpha = 1 / \beta$ ein so erhält man:

$$\alpha * BW_{ges} = \alpha * A + B_0$$

Der Annuitätsfaktor – also die Umkehrung des Barwertfaktors – übernimmt nun wieder als Operator zwei Funktionen:

- a) Er dividiert den Gesamt-Barwert in die einzelnen Barwerte der künftigen Auszahlungen.
- b) Er zinst diese einzelnen Barwerte in geeigneter Form so auf, dass sich für die Dauer der Investition künftig jährlich gleich bleibende Zahlungen in jeweils gleicher Höhe ergeben.

Demnach bedeutet der Ausdruck $[\alpha * BW_{ges}]$ jährlich gleich bleibende Zahlungen, die sowohl die Anschaffungsauszahlung als auch die mit dem Kalkulationszinsfuß diskontierten künftigen Auszahlungen umfassen. Für die Herleitung der Formel der „klassischen Kosten der Energieumwandlung“ wird $[\alpha * BW_{ges}] = K$ geschrieben.

Demnach bedeutet der Ausdruck $[\alpha * A]$ die Umwandlung der Anschaffungsauszahlung in jährlich gleich bleibende Zahlungen unter Berücksichtigung des Zinsfußes.

Die Anschaffungsauszahlung A für ein Kraftwerk lässt sich einfach in spezifische Anschaffungskosten – also $a = A / P$ – zerlegen.

Die Brennstoffkosten B_0 werden zerlegt in:

- w ... spezifischer Wärmebedarf je produzierter Energieeinheit (z.B. MJ / kWh)
- p_w ... Wärmepreis (z.B. EUR / MJ)
- E ... erzeugte Energiemenge (z.B. Anzahl der kWh pro Jahr)
- GE ... Geldeinheiten

Damit erhält man die folgende Grundformel für die annuitätischen Gesamtkosten eines Jahres für eine bestimmte Investition:

$$K = \alpha * a * P + w * p_w * E \quad [GE]$$

Dividiert man nun diese Gleichung durch die in einem Jahr erzeugte Energiemenge E , so erhält man die sogenannten „spezifischen annuitätischen Stromerzeugungskosten“, wie sie auch Musil in seinem energiewirtschaftlichen Standardwerk „Allgemeine Energiewirtschaftslehre“ [2] verwendet (vgl. Darstellung der Kurzfassung im Tagungsband).

Diese „spezifischen annuitätischen Stromerzeugungskosten“ = $[k]$ stellen also spez. Stromerzeugungskosten einer Investitionsalternative dar, die über die Lebensdauer der Anlage gleich bleiben.

$$k = \frac{K}{E} = \frac{\alpha * a * P}{E} + \frac{w * p_w * E}{E} \quad \text{in} \left[\frac{GE}{E} \right]$$

Weiters gilt: $E = P * t$ mit $t = \text{Benutzungsdauer}$

Womit sich die **klassische Kostenformel für die spezifischen annuitätischen Stromerzeugungskosten** wie folgt ergibt:

$$k = \frac{\alpha * a}{t} + w * p_w \quad [GE/E]$$

Einfach ausgedrückt ergeben sich also die spezifischen annuitätischen Stromerzeugungskosten als Summe von spezifischen annuitätischen Anlagekosten und den spezifischen Brennstoffkosten für die Erzeugung einer Energieeinheit.

² Musil, L.; 1972: Allgemeine Energiewirtschaftslehre; Springer-Verlag, Wien; S. 66.

Bedeutung der Wahl des realen oder nominellen Kalkulationszinsfußes

Neben den thermischen Kraftwerken mit einem hohen Anteil zukünftiger Brennstoffkosten kommen heute vermehrt erneuerbare Energien (Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik usw.) mit geringen oder überhaupt fehlenden variablen Erzeugungskosten zum Einsatz.

Wie man bereits bei Anwendung der Kapitalwertmethode oder der Barwertmethode sofort erkennt – und es bei der Formel der spezifischen annuitätischen Stromerzeugungskosten umso deutlicher auffällt – kommt der Relation der Kosten für die Investitionsauszahlung im Verhältnis zu den laufenden Betriebskosten (also vor allem den Brennstoffkosten) wesentliche Bedeutung zu. Die Formeln für Kraftwerke auf Basis erneuerbare Energien und die Formel für thermische Kraftwerke nebeneinander gestellt lauten:

$$k (\text{erneuerbar}) = \frac{\alpha * a}{t} \quad [GE/E]$$

$$k (\text{thermisch}) = \frac{\alpha * a}{t} + w * p_w \quad [GE/E]$$

Man erkennt sofort, dass sich bei Wahl eines hohen Zinsfußes die Wettbewerbsfähigkeit zu Gunsten der thermischen Erzeugung verschiebt – und umgekehrt.

Wie wir bei der Herleitung dieser Formel bereits gesehen haben, kann man heute im günstigsten Fall davon ausgehen, dass die künftigen Primärenergiepreise bestenfalls real konstant bleiben.

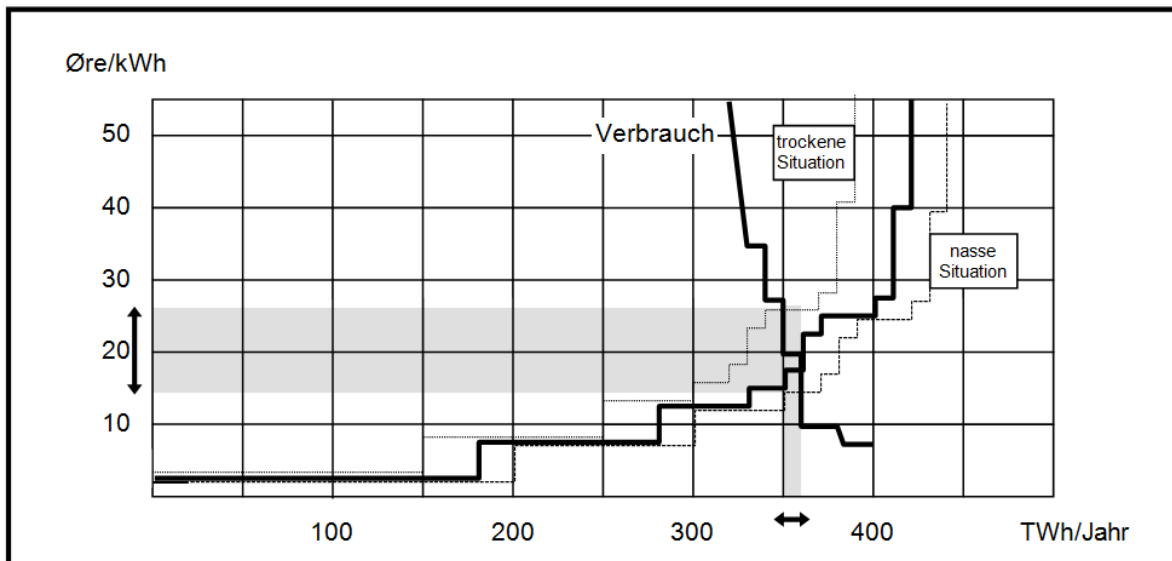
Damit ergibt sich als Voraussetzung für die korrekte Anwendung dieser Formeln als wesentliche Regel, dass der anzuwendende Kalkulationszinssatz für die Ermittlung des Annuitätsfaktors ebenfalls real – also ohne Inflation – anzusetzen ist.

Nutzen für grundsätzliche Überlegungen zu Kapazitätsmärkten

Das Elektrizitätssystem als Gesamtheit weist gegenüber anderen Branchen die wesentliche Besonderheit auf, dass die variablen Produktionskosten mit zunehmender Produktionshöhe besonders stark ansteigen.

Der Schnittpunkt der Kurve der variablen Kosten mit der Nachfragekurve ergibt einen „Marktpreis“, der neben der Abdeckung der dabei angefallenen variablen Kosten noch die Abdeckung der Fixkosten für die Erzeugungskapazität ermöglicht: Abschreibungen und Zinskosten für Eigen- und Fremdkapital sowie den überwiegenden Anteil der Personalkosten, die ja für den Betrieb der Anlagen jedenfalls erforderlich sind.

Eine beispielhafte Darstellung dieser Gegebenheiten wird anhand der folgenden Abbildung gegeben.



Darstellung der Gegebenheiten auf dem skandinavischen Elektrizitätsmarkt 1999 [3]

Stellte man sich ein Elektrizitätssystem vor dem geistigen Auge vor, das ausschließlich mit gleichen Kohlekraftwerken oder ausschließlich gleichen GuD-Anlagen betrieben würde, erkannte man sofort, dass in einem solchen System die Abdeckung von Fixkosten von vornherein nicht möglich wäre.⁴

Ähnliches geschieht aktuell auf dem kontinentaleuropäischen Elektrizitätsmarkt, indem die Kurve der variablen Erzeugungskosten durch die vermehrte Einspeisung von erneuerbarer Energie immer weiter nach rechts verschoben wird. Diesen Effekt hat der Autor bereits früher durch Einzeichnung einer „nassen Situation“ dargestellt. Tatsächlich wirken sich kleine Erzeugungsänderungen im Bereich des steilen Anstiegs der Kostenkurve auf die Preise wie ein Transistor verstärkend aus.

Mit Fortführung des Ausbaus erneuerbarer Energien wird dieser Effekt weiter verstärkt und damit der Schnittpunkt (und der Preis) weiter absinken.

Im obigen Gedankenmodell eines Erzeugungssystems ausschließlich mit gleichen Kohlekraftwerken ergibt sich als interessantes Ergebnis: Es stellt sich ein „Marktpreis“ ein, der genau die und nur die variablen Erzeugungskosten abdeckt. Die Fixkosten verbleiben zur Gänze ungedeckt.

Da diese ja ebenfalls anfallen, müssen auch diese von den Verbrauchern abgedeckt werden.

Die Leistungskomponente in der klassischen Formel „spezifische annuitätische Stromerzeugungskosten“ stellt einen **ersten, wesentlichen Hinweis** für die Höhe der von den Verbrauchern zu bezahlenden Kosten für die Bereitstellung der Erzeugungskapazität dar.

³ Stigler, H.: Rahmen, Methoden und Instrumente für die Energieplanung in der neuen Wirtschaftsordnung der Elektrizitätswirtschaft, Diss. TU Graz, 1999

⁴ Tyma, F., Süßenbacher, W., Bachhiesl U., Stigler H.: Fixkostendeckung über den Stromgroßhandelsmarkt und wohlfahrtsökonomisch optimale Preise; 11. Energieinnovations-symposium, TU Graz 2010