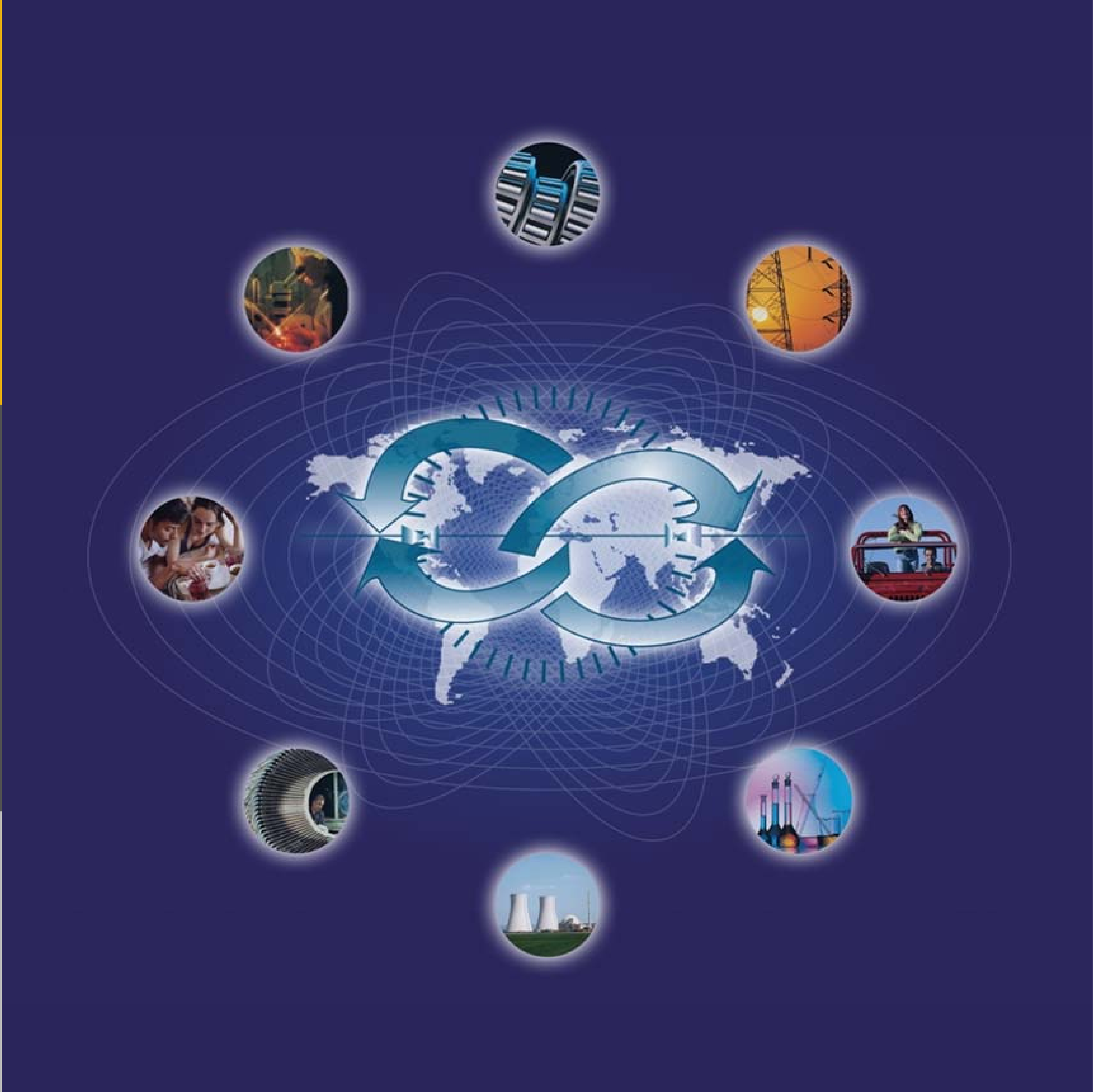

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

STE Research Report 2010-08

IKARUS-FLP – Beschreibung für die Implementierung (Version Juli 2010)

Klaus Weber

Institut für Energieforschung
Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEF-STE)

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

Inhaltsverzeichnis

IKARUS-FLP – Beschreibung für die Implementierung
(Version Juli 2010)

Klaus Weber

Forschungszentrum Jülich, Institute of Energy Research - Systems Analysis and Technology Evaluation (IEF-STE), 52425 Jülich, Germany

Kurzfassung

In [Weber & Martinsen, 2008a, Weber & Martinsen, 2009] wird die Software-Implementierung von IKARUS-FLP, einer unscharfen Erweiterung von IKARUS-LP, beschrieben. Aus der Anwendung des Verfahrens ergaben sich Hinweise auf Änderungen des Algorithmus. Das vorliegende Dokument beschreibt die Version vom Juli 2010. Im Ergebnis hat das mathematische Modell und seine programmtechnische Umsetzung in GAMS weniger Hilfsvariablen, weniger Binärvariablen und es ist klarer strukturiert. Verändert haben sich auch die Einleseprozeduren aus Excel-Dateien. Dies wird in [Weber & Martinsen, 2010b] beschrieben.

Schlüsselwörter

Unscharfe lineare Optimierung, scharfes Äquivalent, Energiesystem-Modellierung, Kompromissbildung, GAMS

I Einleitung

In [Weber & Martinsen, 2008b, Weber & Martinsen, 2010a] wird ein Algorithmus zur Berechnung eines scharfen Äquivalents für ein unscharfes („fuzzy“) Optimierungsproblem beschrieben. Das Problem ist linear, mögliche unscharfe Größen sind die Koeffizienten der Nebenbedingungen sowie ihre rechten Seiten. Der Algorithmus ist die Grundlage der unscharfen Erweiterung IKARUS-FLP des Energiesystemmodells IKARUS-LP. Die Beschreibung seiner Software-Implementierung erfolgt in [Weber & Martinsen, 2008a, Weber & Martinsen, 2009].

Aus der Anwendung des Verfahrens ergaben sich Hinweise auf Änderungen des Algorithmus. Das vorliegende Dokument beschreibt die Version vom Juli 2010. Im Ergebnis hat das mathematische Modell und seine programmtechnische Umsetzung in GAMS weniger Hilfsvariablen, weniger Binärvariablen und es ist klarer strukturiert. Verändert haben sich auch die Einleseprozeduren aus Excel-Dateien. Dies wird in [Weber & Martinsen, 2010b] beschrieben.

Die Implementierung des Algorithmus ist selbsterklärend und setzt die Kenntnis der angeführten Schriften nicht voraus. Seine Beschreibung im Abschnitt II orientiert sich an der Implementierung des Verfahrens in der Programmiersprache GAMS [GAMS, 2007]. Die typischen GAMS-Programmblöcke werden in eigenen Unterabschnitten behandelt: Indexmengen (Abschnitt II.4), Parameter-Definitionen (Abschnitt II.5), Variablen-Deklarationen (Abschnitt II.6), Gleichungen, also Zielfunktion und Nebenbedingungen (Abschnitte II.8 und II.9).

Das scharfe Optimierungsproblem (ohne unscharfe Matrixkoeffizienten oder rechte Seiten) wird nachfolgend als „Referenz-Problem“ bezeichnet:

$$\begin{aligned} & c^T x \rightarrow \min \\ \text{s.t.}\quad & Ax \square b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Darin ist für jede Nebenbedingung

$$\sum_{j \in J} a_{ij}^T x \square b_i\,,\; i \in I \tag{1.2}$$

die Relation $\square$ die kleiner-oder-gleich-Relation $\leq$, die Gleichheits-Relation $=$ oder die größer-oder-gleich-Relation $\geq$. Größen des Referenz-Problems werden auch „ursprünglich“ genannt.

Dem Referenz-Problem entspricht das im Rahmen des IKARUS-Projektes entwickelte deutsche Energiesystem-Modell „IKARUS-LP“ [Martinsen et al., 2003]. Seine Erweiterung mit unscharfen Matrixkoeffizienten und unscharfen rechten Seiten wird als „IKARUS-FLP“ [Weber & Martinsen, 2010a] bezeichnet.

II Beschreibung des Algorithmus

II.1 Vorbemerkung

Für die Fuzzyfizierung des Problems (1.1) werden einzelne Elemente von kleiner-oder-gleich-Ungleichungen $a_i^T x \le b_i$, $i \in I$ durch unscharfe Mengen ersetzt, im einzelnen sind dies Elemente a_{ij}, $i \in I$, $j \in J$ der Matrix A der Nebenbedingungen und Elemente b_i, $i \in I$ des Vektors b der rechten Seite. Das fuzzyfizierte Problem kann nicht direkt mit einem Optimierungslöser gelöst werden, sondern muss zunächst in sein „scharfes Äquivalent", eine mathematische Problembeschreibung ohne unscharfe Mengen überführt werden. Die Berechnung des Algorithmus wird nachfolgend beschrieben und folgt seiner Implementierung in der Programmiersprache GAMS [GAMS, 2007]. Die GAMS-Bezeichner sind in der `Courier`-Schrift angegeben.

II.2 t-Normen

Die Skalarprodukt-Nebenbedingungen (Abschnitt II.9.4) und Höhen-Nebenbedingungen (Abschnitt II.9.6) hängen von der Wahl zweier t-Normen ab, die vom Nutzer gewählt werden können und nicht übereinstimmen müssen. Zur Auswahl stehen die Minimum-t-Norm $t_{\min}$ und die Lukasiewicz-t-Norm t_L:

- t^{sp}: t-Norm der Skalarprodukt-Nebenbedingungen (Parameter `t_sp(t_norm)`); Vorgabe: $t_{\min}$ oder t_L;
- t^h: t-Norm der Höhen-Nebenbedingungen (Parameter `t_h(t_norms)`); Vorgabe: $t_{\min}$ (t_L ist nicht implementiert).

II.3 Verfahrensparameter

Für die „Linearisierung" nichtlinearer Nebenbedingungen (siehe Abschnitte II.9.4 – 0) sind folgende Parameter zu definieren:

- M: sehr große Zahl (Skalar `MM`); Vorgabe: $M = 10^5$;
- L: sehr große Zahl (Skalar `LL`); Vorgabe: $L = 10^5$;
- n: ganze Zahl (Compiler-Variable `noMultDiscInt`); Vorgabe: $n = 25$;
- $r_{\max}^{sl}$: maximaler Anteil einzelner nicht-zulässiger Slacks am Primärenergieverbrauch (Skalar `maxSlackShareSingle`);
- $r_{\max,ttl}^{sl}$: maximaler Anteil aller nicht-zulässigen Slacks am Primärenergieverbrauch (Skalar `maxSlackShareTotal`);
- f_{cost}: Flag, das festlegt, ob die Systemkosten berücksichtigt werden (Skalar: `costFlag`)

- f_{monotony}: Flag, das festlegt, ob der Erfülltheitsgrad der unscharfen Nebenbedingungen von Optimierungsperiode zu Optimierungsperiode monoton steigen muss (Skalar `monotonyFlag`);
- $\underline{h}_i$: Untere Schranke für die Variable h_i (siehe Abschnitt II.6.2) (Parameter `param(paramSet)`) wenn $f_{\text{monotony}} = 1$.

M und L dürfen nur so groß gewählt werden, dass kleine Zahlen nicht ausgelöscht werden. Der Wert n darf nicht zu groß gewählt werden, weil sonst die Anzahl der Binärvariablen und damit die Rechenzeit deutlich zunimmt.

II.4 Indexmengen

Zu unterscheiden sind Indexmengen der Nebenbedingungen, Indexmengen der Optimierungsvariablen und Indexmengen der „Linearisierung".

II.4.1 Indexmengen der Nebenbedingungen

Nach der Fuzzyfizierung wird die Indexmenge I der ursprünglichen Nebenbedingungen (1.2) wie folgt partitioniert:

- I_0: Indexmenge der Nebenbedingungen ohne unscharfe Größen (Menge `i_0(i)`);
- I_c: Indexmenge der Nebenbedingungen mit mindestens einem unscharfen Matrixkoeffizienten („coefficient") $\tilde{a}_{ij}$ und einer scharfen rechten Seite (Menge `i_c(i)`);
- I_r: Indexmenge der Nebenbedingungen mit scharfen Matrixkoeffizienten und unscharfer rechter Seite („right hand side") $\tilde{b}_i$ (Menge `i_r(i)`);
- I_{cr}: Indexmenge der Nebenbedingungen mit mindestens einem unscharfen Matrixkoeffizienten $\tilde{a}_{ij}$ und unscharfer rechter Seite $\tilde{b}_i$ (Menge `i_cr(i)`).

Nur Nebenbedingungen mit kleiner-oder-gleich-Relation,

$$\sum_{j \in J} a_{ij}^T x \le b_i \tag{2.1}$$

werden fuzzifiziert. Nebenbedingungen mit größer-oder-gleich-Relation, $\sum_{j \in J} a_{ij}^T x \ge b_i$ lassen sich durch Multiplikation mit -1 in Nebenbedingungen der Form (2.1) überführen. Gleichheits-Nebenbedingungen, $\sum_{j \in J} a_{ij}^T x = b_i$ können durch zwei Nebenbedingungen der Form (2.1) ausgedrückt werden.

Eine Partitionierung der Indexmenge I_0 ist nötig, um Slacks behandeln zu können:

- I_0^{sl}: Indexmenge der scharfen Nebenbedingungen, deren Slacks beschränkt sind (Menge `i_slack_not_ok(i)`);

- I_{0l}^{sl} : Indexmenge der scharfen kleiner-oder-gleich-Nebenbedingungen, deren Slacks beschränkt sind (Mengen `i_slack_not_ok(i)` und `i_0l(i)`);
- I_{0g}^{sl} : Indexmenge der scharfen größer-oder-gleich Nebenbedingungen, deren Slacks beschränkt sind Mengen `i_slack_not_ok(i)` und `i_0g(i)`).

II.4.2 Indexmengen der Optimierungsvariablen

Nach der Fuzzyfizierung wird die Indexmenge der Optimierungsvariablen in (1.1) J für jede Nebenbedingung $i \in I$ wie folgt partitioniert:

- J_i^f : Indexmenge der unscharfen („crisp“) Koeffizienten $\tilde{a}_{ij}$ (Menge `ij_f(i,j)`);
- J_i^c : Indexmenge der scharfen („fuzzy“) Koeffizienten a_{ij} (Menge `ij_c(i,j)`).

Für $i \in I_0 \cup I_r$ ist $J_i^c = J_i$ und $J_i^f = \varnothing$. Für $i \in I_c \cup I_{cr}$ ist $J_i^c \subset J_i$ und $J_i^f \neq \varnothing$.

II.4.3 Indexmengen der „Linearisierung“

Aufgrund der Fuzzyfizierung treten nichtlineare Nebenbedingungen auf. Sie werden durch äquivalente gemischt-ganzzahlige Ausdrücke ersetzt, oder durch gemischt-ganzzahlige Ausdrücke angenähert. Diese „Linearisierung“ erfordert die Einführung von binären Hilfsvariablen (siehe Abschnitte II.9.4 – 0) und einer Indexmenge der Diskretisierungsintervalle $K^{\text{disc}} = \{1,\ldots,n\}$ (Menge `k_disc`) mit n aus Abschnitt II.3. Sie legt die „Linearisierung“ von Produkten aus Optimierungsvariablen fest (siehe Abschnitte II.6.3, 0).

II.5 Parameter

Zielfunktionsparameter sind die Koeffizienten c_j, $j \in J$ (Parameter `c(jc)`). Die Parameter der Nebenbedingungen werden nach Indizes der Nebenbedingungen (Abschnitt II.4.1) und der Optimierungsvariablen (Abschnitt II.4.2) unterschieden. Unscharfe Parameter sind mit einer Tilde gekennzeichnet.

- $i \in I_0$: a_{ij} für alle $j \in J$ und b_i (Parameter `a_fuzzy(i,jc)`, `b_fuzzy(i)`, `ac(i,jc)`, `b(i)`);
- $i \in I_c$: a_{ij} für alle $j \in J_i^c$, $\tilde{a}_{ij}$ für alle $j \in J_i^f$ und b_i (Parameter `a_fuzzy(i,jc)`, `b_fuzzy(i)`, `u_a_c(i,jc)`, `u_a_f(i,j,k)`, `u_b_c(i)`);
- $i \in I_r$: a_{ij} für alle $j \in J$ und $\tilde{b}_i$ (Parameter `a_fuzzy(i,jc)`, `b_fuzzy(i)`, `u_a_c(i,jc)`, `u_b_f(i,k)` ;
- $i \in I_{cr}$: a_{ij} für alle $j \in J_i^c$, $\tilde{a}_{ij}$ für alle $j \in J_i^f$ und $\tilde{b}_i$ (Parameter `a_fuzzy(i,jc)`, `b_fuzzy(i)`, `u_a_c(i,jc)`, `u_a_f(i,j,k)`, `u_b_f(i,k)`.

Alle unscharfen Mengen sind vom LR-Typ, d. h. ihre Zugehörigkeitsfunktionen sind durch ein Quadrupel

$$\left(\underline{x}, \overline{x}, \underline{\xi}, \overline{\xi}\right)$$

(Menge k) und die Referenzfunktionen $L(x)$, $R(x)$ gegeben. Für die Berechnung des scharfen Äquivalents werden im folgenden die Referenzfunktionen $L(x) = R(x) = \max\{0, 1-x\}$ angenommen, so dass die Zugehörigkeitsfunktionen trapezförmig sind. Die oben angeführten unscharfen Mengen sind durch folgende Quadrupel gegeben:

- $\tilde{a}_{ij} = \left(\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}, \underline{\alpha}_{ij}, \overline{\alpha}_{ij}\right)_{LR}$ für $i \in I_c \cup I_{cr}$, $j \in J_i^f$ (Parameter `u_a_f(i, j, k)`),
- $\tilde{b}_i = \left(\underline{b}_i, \overline{b}_i, \underline{\beta}_i, \overline{\beta}_i\right)_{LR}$ für $i \in I_r \cup I_{cr}$ (Parameter `u_b_f(i,k)`).

II.6 Variablen und ihre Schranken

Es gibt

- ursprüngliche Optimierungsvariablen,
- Hilfs-Optimierungsvariablen und
- Umformungs-Optimierungsvariablen.

Wenn in den folgenden Unterabschnitten zu den einzelnen Variablen keine Schranken angegeben sind, so sind sie unbeschränkt.

II.6.1 Ursprüngliche Optimierungsvariablen

Die ursprünglichen Optimierungsvariablen mit ihren Schranken sind:

$x_j \in \mathbb{R}$ mit $0 \le x_j$, $j \in J$ (positive Variable `x_fuzzy(jc)`).

II.6.2 Hilfs-Optimierungsvariablen

Die Hilfs-Optimierungsvariablen mit ihren Schranken sind:

$\lambda \in \mathbb{R}$ mit $0 \le \lambda \le 1$ (Variable `lambda`);
$\text{tpes} \in \mathbb{R}$ (Variable `tpes`);
$0 \le \lambda_{\text{sust}} \le 1$ (positive Variable `lambda_sust`);
$0 \le \lambda_{\text{cost}} \le 1$ (positive Variable `lambda_cost`);

sowie

- für $i \in I_0^{sl}$:

  $sl_i \in \mathbb{R}$ (positive Variable `slack(i)`)

- für $i \in I_0$:

  $s_i \in \mathbb{R}$ (Variable `s_i(i)`);

- für $i \in I_r$:

  $s_i \in \mathbb{R}$;
  $h_i \in \mathbb{R}$ (positive Variable `h(i)`) mit $0 \le h_i \le 1$.

  Wenn $f_{\text{monotony}} = 1$, dann gilt: $\underline{h}_i \le h_i \le 1$.

- für $i \in I_c \cup I_{cr}$:

$\underline{s}_i, \overline{s}_i \in \mathbb{R}$ (Variablen `s_lo(i)`, `s_up(i)`);

$\underline{\sigma}_i, \overline{\sigma}_i \in \mathbb{R}$ mit $0 \le \underline{\sigma}_i, \overline{\sigma}_i$ (positive Variablen `sigma_lo(i)`, `sigma_up(i)`);

$h_i \in \mathbb{R}$ mit $0 \le h_i \le 1$;

$\underline{v}_i, \overline{v}_i \in \mathbb{R}$ mit $0 \le \underline{v}_i, \overline{v}_i$ (positive Variablen `v_lo(i)`, `v_up(i)`).

II.6.3 Umformungs-Optimierungsvariablen

Die Umformung nichtlinearer Nebenbedingungen („Linearisierung") erfordert die Einführung von folgenden binären Variablen:

- Für Skalarprodukt-Nebenbedingungen (siehe Abschnitt II.9.4), nur wenn $t^{\mathrm{sp}} = t_L$:
  $\underline{y}_{ij}^{\mathrm{sp}}, \overline{y}_{ij}^{\mathrm{sp}} \in \mathrm{SOS}_1$[1] für $i \in I_c \cup I_{cr}$, $j \in J$ (sos1 Variable `y_sp_lo(i,j)`, `y_sp_up(i,j)`),
  d. h. $\underline{y}_{ij}^{\mathrm{sp}}, \overline{y}_{ij}^{\mathrm{sp}} \in \{0,1\}$ und $\sum_{j \in J} \underline{y}_{ij}^{\mathrm{sp}} = 1, \sum_{j \in J} \overline{y}_{ij}^{\mathrm{sp}} = 1$ (Gleichungen `eSpLoSos1`, `eSpUpSos1`)
- Für Höhen-Nebenbedingungen (siehe Abschnitt II.9.6), nur wenn $t^h = t_{\min}$:
  $y_i^h \in \{0,1\}$ für $i \in I \setminus I_0$ (Binärvariable `y_h(i)`)
- Für Multiplikations-Nebenbedingungen (siehe Abschnitt 0), nur wenn $t^h = t_{\min}$:
  $y_{ik}^{\mathrm{mult}} \in \mathrm{SOS}_1$ für $i \in I_c \cup I_{cr}$, $k \in K^{\mathrm{disc}}$ (sos1 Variable `y_mult(i,k_disc)`),
  d. h. $y_{ik}^{\mathrm{mult}} \in \{0,1\}$ und $\sum_{j \in J} y_{ik}^{\mathrm{mult}} = 1$ (Gleichungen `eMultSos1(i)`)

II.7 Hilfs-Optimierungsprobleme

II.7.1 Problemformulierung

Die ursprüngliche Zielfunktion $c^T x$ wird in eine Zielfunktions-Nebenbedingung (Abschnitt II.9.1) überführt, zu deren Formulierung die Parameter $\overline{z}$ und ς (Parameter `param(z_up)`, `param(zeta_up)`) nötig sind. Sie können entweder vom Nutzer vorgegeben oder durch Lösen der folgenden zwei linearen Optimierungsprobleme („Hilfs-LP") bestimmt werden:

- $\overline{z} + \varsigma$ ist der optimale Zielfunktionswert eines LP mit „engen" Nebenbedingungen.
- $\overline{z}$ ist der optimale Zielfunktionswert eines LP mit „weiten" Nebenbedingungen.

II.7.1.1 Hilfs-Optimierungsproblem mit „engen" Nebenbedingungen

„Eng" sind die Nebenbedingungen dann, wenn im unscharfen Problem die unscharfen Matrixkoeffizienten $\tilde{a}_{ij}$ durch einen „großen" Wert $\hat{a}_{ij}$ (Parameter `a_tight(i,jc)`) aus dem Träger von $\tilde{a}_{ij}$ und die unscharfe rechte Seite $\tilde{b}_i$ durch

---

[1] SOS_1: special ordered set of type 1

einen „kleinen“ Wert $\breve{b}_i$ (Parameter `b_tight(i)`) aus dem Träger von $\tilde{b}_i$ ersetzt werden. Dem Nutzer werden zwei Möglichkeiten geboten:

1. Für $i \in I_c \cup I_{cr}$, $j \in J_i^f$: $\hat{a}_{ij} := \bar{a}_{ij} + \bar{\alpha}_{ij}$; und für $i \in I_{cr} \cup I_r$: $\breve{b}_i := \underline{b}_i - \underline{\beta}_i$.
2. Falls $\bar{\alpha}_{ij} = 0$: $\hat{a}_{ij} := \underline{a}_{ij}$, sonst $\hat{a}_{ij} := \bar{a}_{ij} + \bar{\alpha}_{ij}$;

   falls $\underline{\beta}_i = 0$: $\breve{b}_i := \bar{b}_i$, sonst $\breve{b}_i := \underline{b}_i - \underline{\beta}_i$.

Das Optimierungsproblem lautet (Modell `m_tight`):

$$
\begin{array}{lll}
 & c^T x \to \min & \\
\text{s.t.} & \sum\limits_{j \in J} a_{ij} x_j \;\Box\; b_i & i \in I_0 \\
 & \sum\limits_{j \in J_i^c} a_{ij} x_j + \sum\limits_{j \in J_i^f} \hat{a}_{ij} x_j \le b_i & i \in I_c \\
 & \sum\limits_{j \in J} a_{ij} x_j \le \breve{b}_i & i \in I_r \\
 & \sum\limits_{j \in J_i^c} a_{ij} x_j + \sum\limits_{j \in J_i^f} \hat{a}_{ij} x_j \le \breve{b}_i & i \in I_{cr} \\
 & x \ge 0 &
\end{array}
\quad ; \qquad (2.2)
$$

(Variable: `x_tight(jc)`; Gleichungen: `eObjTight`, `eConTight1(i_0e)`, `eConTight2(i_0l)`, `eConTight3(i_0g)`, `eConTight4(i_c)`, `eConTight5(i_r)`, `eConTight6(i_cr)`)

II.7.1.2 Hilfs-Optimierungsproblem mit „weiten“ Nebenbedingungen

„Weit“ sind die Nebenbedingungen dann, wenn im unscharfen Problem die unscharfen Matrixkoeffizienten $\tilde{a}_{ij}$ durch einen „kleinen“ Wert $\breve{a}_{ij}$ (Parameter: `a_loose(i,jc)`) aus dem Träger von $\tilde{a}_{ij}$ und die unscharfe rechte Seite $\tilde{b}_i$ durch einen „großen“ Wert $\hat{b}_i$ (Parameter: `b_loose(i)`) aus dem Träger von $\tilde{b}_i$ ersetzt werden. Dem Nutzer werden zwei Möglichkeiten geboten:

1. Für $i \in I_c \cup I_{cr}$, $j \in J_i^f$: $\breve{a}_{ij} := \underline{a}_{ij} - \underline{\alpha}_{ij}$; und für $i \in I_{cr} \cup I_r$: $\hat{b}_i := \bar{b}_i + \bar{\beta}_i$.
2. Falls $\underline{\alpha}_{ij} = 0$: $\breve{a}_{ij} := \bar{a}_{ij}$, sonst $\breve{a}_{ij} := \underline{a}_{ij} - \underline{\alpha}_{ij}$;

   falls $\bar{\beta}_i = 0$: $\hat{b}_i := \underline{b}_i$, sonst $\hat{b}_i := \bar{b}_i + \bar{\beta}_i$.

Das Optimierungsproblem lautet:

$$
\begin{aligned}
& c^T x \rightarrow \min \\
\text{s.t.}\quad & \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \; \square \; b_i && i \in I_0 \\
& \sum_{j \in J_i^c} a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i^f} \breve{a}_{ij} x_j \le b_i && i \in I_c \\
& \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \le \widehat{b}_i && i \in I_r \\
& \sum_{j \in J_i^c} a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i^f} \breve{a}_{ij} x_j \le \widehat{b}_i && i \in I_{cr} \\
& x \ge 0
\end{aligned}
\quad . \qquad (2.3)
$$

(Variable: `x_loose(jc)`; Gleichungen: `eObjLoose`, `eConLoose1(i_0e)`, `eCon-Loose2(i_0l)`, `eConLoose3(i_0g)`, `eConLoose4(i_c)`, `eConLoose5(i_r)`, `eConLoose6(i_cr)`)

II.7.2 Verfahren bei Unzulässigkeit

Die zulässigen Bereiche der beiden linearen Optimierungsprobleme (2.2) und (2.3) sind Untermenge bzw. Obermenge des zulässigen Bereichs des unscharfen Optimierungsproblems. Bei Unzulässigkeit von (2.3) wird deshalb auch das unscharfe Problem keine Lösung besitzen. In diesem Fall wird das Verfahren abgebrochen. Falls Optimierungsproblem (2.3) zulässig, aber Optimierungsproblem (2.2) unzulässig ist, dann wird das Optimierungsproblem vom Löser CPLEX automatisch entsprechend den gesetzten Optionen (Optionsdatei: `cplex.opt`; siehe [Weber & Martinsen, 2010b], Abschnitt 6.3) relaxiert, dass es lösbar ist.

II.8 Zielfunktion

Die Zielfunktion besteht nur aus der Variablen λ, d. h.

$$\lambda \rightarrow \max \; .$$

(Variable: `lambda`)

II.9 Nebenbedingungen

Es gibt folgende Arten von Nebenbedingungen:

- Nachhaltigkeits-Nebenbedingung,
- Kosten-Nebenbedingung,
- Skalarprodukt-Nebenbedingungen,
- Lambda-Nebenbedingungen,
- Monotonie-Nebenbedingungen,
- Höhen-Nebenbedingungen,
- Multiplikations-Nebenbedingungen,
- Slack-Nebenbedingungen.

Die Nebenbedingungen können in dieser Reihenfolge nacheinander erzeugt werden. Zum besseren Verständnis sind nichtlineare Nebenbedingungen vor und nach der

„Linearisierung“ angegeben. Nur die linearisierte Form wird implementiert. Zum Verständnis der „Linearisierung“ sind auch die Schranken der Variablen in Abschnitt II.6 zu beachten.

II.9.1 Nachhaltigkeits-Nebenbedingung

$$\lambda_{\mathrm{sust}} \leq \lambda$$

(Gleichung: `eObjFuzzyLambdaSust`)

II.9.2 Kosten-Nebenbedingung

Wenn $f_{\mathrm{cost}} = 1$ gilt, dann:

$$\lambda_{\mathrm{cost}} \leq \lambda$$

(Gleichung: `eObjFuzzyLambdaCost`)

II.9.3 Zielfunktions-Nebenbedingungen

Die Zielfunktions-Nebenbedingungen lauten:

$$\bar{\varsigma} \cdot \lambda + c^T x \leq \bar{z} + \bar{\varsigma}$$

(Gleichung: `eConObj`) Die Parameter $\bar{z}$ und $\bar{\varsigma}$ sind durch die Lösungen der beiden Hilfs-Optimierungsprobleme gegeben (siehe Abschnitt II.7).

II.9.4 Skalarprodukt-Nebenbedingungen

Die Skalarprodukt-Nebenbedingungen hängen je nach Index von der Wahl der t-Norm t^{sp} ab (siehe Abschnitt II.2). Die Nebenbedingungen sind:

- Für $i \in I_0$:

  $$s_i \,\square\, b_i \ , \ \square \in \{\leq, =, \geq\} \ ;$$

  (Gleichungen: `eConSp1(i_0l)`, `eConSp2(i_0e)`, `eConSp3(i_0g)`)

  $$s_i = \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \ .$$

  (Gleichung: `eConSp4(i_0)`)
- Für $i \in I_r$:

  $$s_i = \sum_{j \in J} a_{ij} x_j \ .$$

  (Gleichung: `eConSp5(i_r)`)
- Für $i \in I_c \cup I_{cr}$:

  $$\begin{aligned} \underline{s}_i &= \sum_{j \in J_i^c} a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i^f} \underline{a}_{ij} x_j \\ \bar{s}_i &= \sum_{j \in J_i^c} a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i^f} \bar{a}_{ij} x_j \end{aligned} \ .$$

  (Gleichungen: `eConSp6(i_ccr)`, `eConSp7(i_ccr)`)

  In Abhängigkeit von t^{sp} ergeben sich folgende weitere Nebenbedingungen:

  - Für $t^{\mathrm{sp}} = t_{\min}$:

$$\underline{\sigma}_i = \sum_{j \in J_i^f} \underline{\alpha}_{ij} x_j$$
$$\overline{\sigma}_i = \sum_{j \in J_i^f} \overline{\alpha}_{ij} x_j \quad .$$

(Gleichungen: `eConSp8(i_ccr)`, `eConSp9(i_ccr)`)

- Für $t^{\text{sp}} = t_L$ (Vorgabe):

  Vor der „Linearisierung“ (<u>nicht</u> implementieren!):

$$\underline{\sigma}_i = \max_{j \in J_i^f} \left\{ \underline{\alpha}_{ij} x_j \right\}$$
$$\overline{\sigma}_i = \max_{j \in J_i^f} \left\{ \overline{\alpha}_{ij} x_j \right\} \quad .$$

  Nach der „Linearisierung“:

$$\underline{\alpha}_{ij} x_j \le \underline{\sigma}_i \quad \text{für } j \in J_i^f$$

  (Gleichung: `eConSp10(i_ccr)`);

$$\underline{\sigma}_i \le \underline{\alpha}_{ij} x_j + M\left(1 - \underline{y}_{ij}^{\text{sp}}\right) \quad \text{für } j \in J_i^f$$

  (Gleichung: `eConSp11(i_ccr)`);

$$\overline{\alpha}_{ij} x_j \le \overline{\sigma}_i \quad \text{für } j \in J_i^f$$

  (Gleichung: `eConSp12(i_ccr)`);

$$\overline{\sigma}_i \le \overline{\alpha}_{ij} x_j + M\left(1 - \overline{y}_{ij}^{\text{sp}}\right) \quad \text{für } j \in J_i^f$$

  (Gleichung: `eConSp13(i_ccr)`).

II.9.5 Lambda-Nebenbedingungen

Für $i \in I_r \cup I_c \cup I_{cr}$: $\lambda_{\text{sust}} \le h_i$ (Gleichung: `eConLambda(i)`).

II.9.6 Höhen-Nebenbedingungen

Die Höhen-Nebenbedingungen hängen vom Index der Nebenbedingung und, je nach Index von der Wahl der t-Norm t^h ab (siehe Abschnitt II.2), für die hier nur der Fall $t^h = t_{\min}$ betrachtet wird. Die Nebenbedingungen sind:

- Für $i \in I_c$: vor der „Linearisierung“ (<u>nicht</u> implementieren!):

$$\begin{array}{lll} \text{IF} & b_i \le \underline{s}_i \quad \text{THEN} & \underline{s}_i - \underline{\sigma}_i + \underline{\sigma}_i h_i = b_i \\ \text{ELSE} & & h_i = 1 \end{array}$$

  Nach der „Linearisierung“ (Die Produkte $\underline{\sigma}_i h_i$ und $\overline{\sigma}_i h_i$ werden durch die Variablen $\underline{v}_i$ und $\overline{v}_i$ ersetzt.):

$$b_i \le \underline{s}_i + M\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight1(i_c)`);

$$\underline{v}_i \le b_i - \underline{s}_i + \underline{\sigma}_i + M\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight2(i_c)`);

$$\underline{v}_i \ge b_i - \underline{s}_i + \underline{\sigma}_i + L\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight3(i_c)`);

$$\underline{s}_i \le b_i + M y_i^h$$

  (Gleichung: `eConHeight4(i_c)`);

$$h_i \geq 1 - Ly_i^h$$

(Gleichung: `eConHeight5(i_c)`).

- Für $i \in I_r$: vor der „Linearisierung“ (<u>nicht</u> implementieren):

  IF $\bar{b}_i \leq s_i$ THEN $s_i + \beta_i h_i = \bar{b}_i + \bar{\beta}_i$
  ELSE $h_i = 1$

  Nach der „Linearisierung“:

  $$\bar{b}_i \leq s_i + M\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight11(i_c)`);

  $$\bar{\beta}_i h_i + s_i \leq b_i + \bar{\beta}_i + M\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight12(i_c)`);

  $$\bar{\beta}_i h_i + s_i \geq b_i + \bar{\beta}_i - L\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight13(i_c)`);

  $$s_i \leq \bar{b}_i + My_i^h$$

  (Gleichung: `eConHeight14(i_c)`);

  $$h_i \geq 1 - Ly_i^h$$

  (Gleichung: `eConHeight15(i_c)`).

- Für $i \in I_{cr}$: vor der „Linearisierung“ (<u>nicht</u> implementieren!):

  IF $\bar{b}_i \leq \underline{s}_i$ THEN $\underline{s}_i - \underline{\sigma}_i + \underline{\sigma}_i h_i + \bar{\beta}_i h_i = \bar{b}_i + \bar{\beta}_i$
  ELSE $h_i = 1$

  Nach der „Linearisierung“ (Die Produkte $\underline{\sigma}_i h_i$ und $\bar{\sigma}_i h_i$ werden durch die Variablen $\underline{v}_i$ und $\bar{v}_i$ ersetzt.):

  $$\bar{b}_i \leq \underline{s}_i + M\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight21(i_c)`);

  $$\underline{v}_i + \underline{s}_i - \underline{\sigma}_i + \bar{\beta}_i h_i \leq \bar{b}_i + \bar{\beta}_i + M\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight22(i_c)`);

  $$\underline{v}_i + \underline{s}_i - \underline{\sigma}_i + \bar{\beta}_i h_i \geq \bar{b}_i + \bar{\beta}_i - L\left(1 - y_i^h\right)$$

  (Gleichung: `eConHeight23(i_c)`);

  $$\underline{s}_i \leq \bar{b}_i + My_i^h$$

  (Gleichung: `eConHeight24(i_c)`);

  $$h_i \geq 1 - Ly_i^h$$

  (Gleichung: `eConHeight25(i_c)`).

II.9.7 Multiplikations-Nebenbedingungen

Multiplikations-Nebenbedingungen gibt es nur für Indizes $i \in I_c \cup I_{cr}$.

Vor der Linearisierung (<u>nicht</u> implementieren!) lauten die ursprünglichen Gleichungen:

$$\underline{v}_i = \underline{\sigma}_i h_i;$$
$$\bar{v}_i = \bar{\sigma}_i h_i.$$

Nach ihrer Diskretisierung (<u>nicht</u> implementieren!) erhält man:

IF $\frac{2k-1}{2n} < h_i \leq \frac{2k+1}{2n}$ THEN $\underline{v}_i = \frac{k}{n}\underline{\sigma}_i, \overline{v}_i = \frac{k}{n}\overline{\sigma}_i$.

for $k \in K^{\text{disc}}$

Nach der Linearisierung gilt für $k \in K^{\text{disc}}$:

$$h_i \geq \frac{2k-1}{2n} - L\left(1 - y_{ik}^{\text{mult}}\right)$$

(Gleichung: `eConMult1(i_ccr,k_disc)`);

$$h_i \leq \frac{2k-1}{2n} + M\left(1 - y_{ik}^{\text{mult}}\right)$$

(Gleichung: `eConMult2(i_ccr,k_disc)`);

$$\underline{v}_i \leq \frac{k}{n}\underline{\sigma}_i + M\left(1 - y_{ik}^{\text{mult}}\right)$$

(Gleichung: `eConMult3(i_ccr,k_disc)`);

$$\underline{v}_i \geq \frac{k}{n}\underline{\sigma}_i - L\left(1 - y_{ik}^{\text{mult}}\right)$$

(Gleichung: `eConMult4(i_ccr,k_disc)`);

$$\overline{v}_i \leq \frac{k}{n}\overline{\sigma}_i + M\left(1 - y_{ik}^{\text{mult}}\right)$$

(Gleichung: `eConMult3(i_ccr,k_disc)`);

$$\overline{v}_i \geq \frac{k}{n}\overline{\sigma}_i - L\left(1 - y_{ik}^{\text{mult}}\right)$$

(Gleichung: `eConMult4(i_ccr,k_disc)`).

II.9.8 Slack-Nebenbedingungen

Für $i \in I_{0l}^{sl}$:

$$sl_i = b_i - s_i$$

(Gleichung: `eSlackSp2(i_0l)`);

Für $i \in I_{0g}^{sl}$:

$$sl_i = s_i - b_i$$

(Gleichung: `eSlackSp3(i_0g)`);

$$\text{tpes} = \sum_{j \in J_{\text{tpes}}} c_j^{\text{tpes}} x_j$$

(Gleichung: `eSlack0`);

Für $i \in I_{0l}^{sl}$:

$$sl_i \leq r_{\max}^{sl} \cdot \text{tpes}$$

(Gleichung: `eSlack1(i_0l)`);

Für $i \in I_{0g}^{sl}$:

$$sl_i \leq r_{\max}^{sl} \cdot \text{tpes}$$

(Gleichung: `eSlack2(i_0g)`);

$$\sum_{i \in I_0^{sl}} sl_i \leq r_{\max,\text{ttl}}^{sl} \cdot \text{tpes}$$

(Gleichung: `eSlack3`).

III Literaturverzeichnis

GAMS (Ed.) (2007) *GAMS - A User's Guide*, GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA.

MARTINSEN, D., MARKEWITZ, P., MÜLLER, D., VÖGELE, S. & HAKE, J.-F. (2003) *IKARUS - Energieszenarien bis 2030*. In MARKEWITZ, P. & STEIN, G. (Eds.) *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland.* Jülich, Forschungszentrum Jülich.

WEBER, K. & MARTINSEN, D. (2008a) IKARUS-FLP$_3$ - Beschreibung für die Implementierung und Beispiel. Forschungszentrum Jülich, STE Research Report 2008-07

WEBER, K. & MARTINSEN, D. (2008b) A Relation-Based Approach to Fuzzy Linear Programming and Its Application in Energy Systems Modeling. Forschungszentrum Jülich, STE Preprint 2008-26

WEBER, K. & MARTINSEN, D. (2009) IKARUS-FLP$_3$ - Beschreibung für die Implementierung mit Beispielen. Forschungszentrum Jülich, STE Research Report 2009-11

WEBER, K. & MARTINSEN, D. (2010a) From System Cost Minimization to Sustainability Maximization – A New Fuzzy Program Approach to Energy Systems Analysis. *Information Sciences*:submitted.

WEBER, K. & MARTINSEN, D. (2010b) Optimization of Sustainability by Means of IKARUS-FLP and Energy Indicators for Sustainable Development (EISD). Forschungszentrum Jülich, STE Research Report 2010-02

Preprints 2010

01/2010 Hansen, P.: Klimaschutz im Europäischen Gebäudesektor – Auf dem Weg zum Strukturwandel mit der neuen Gebäude-Richtlinie?

02/2010 Martinsen, D., Markewitz, P., Weber, K.: Energy scenarios for Germany up to 2050 in view of energy economy indicators.

03/2010 Markewitz, P., Schreiber, A., Zapp, P.: Implementierung von CCS-Technik in Deutschland: Strategien und umweltseitige Auswirkungen

04/2010 Vögele, S., Wassermann, S. Fuchs, G.: Globalisierung, Multinationale Unternehmen und Innovationen im Kohlekraftwerkssektor.

05/2010 Weber, K., Martinsen, D.: Computation of transition paths towards sustainable energy systems by means of Fuzzy Optimization

06/2010 Weber, K., Martinsen, D.: From cost minimization to sustainability maximization – A new approach to energy systems analysis.

07/2010 Geske, J., Herold J.: Carbon capture transport and storage investment and management in an environment of technological and price uncertainties.

08/2010 Schlör, H., Fischer, W., Hake, J.-Fr.: Adjusted genuine savings and HDI - a two dimensional indicator for sustainability.

09/2010 Schlör, H., Fischer, W., Hake, J.-Fr.: Measuring income and energy distribution in Germany with the Atkinson Index.

10/2010 Schlör, H., Fischer, W., Hake, J.-Fr.: Is the German energy system sustainable? An analysis based on the UNCSD theme-based sustainability approach.

11/2010 Kuckshinrichs, W., Markewitz, P., Peters, M., Leitner, W.: Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO_2.

12/2010 Claas, B., Marker, S., Bickert, S., Linssen, J., Strunz, K.: Integration of plug-in hybrid and electric vehicles: Experience from Germany.

13/2010 Sander, M.: Structure and effects of national and transnational policy networks in the Russian-German energy relations.

14/2010 Geske, J.: Modeling the development of demographic urban structures via the family/household life cycle.

15/2010 Sander, M.: Institutionelle und personelle Netzwerke zwischen politischen und wirtschaftlichen Akteuren im russischen Energiesektor

16/2010 Schumann, D., Pietzner, K., Esken, A.: Umwelt, Energiequellen und CCS: Regionale Unterschiede und Veränderungen von Einstellungen der deutschen Bevölkerung.

17/2010 Baufumé, S., Hake, J.-Fr., Linssen, J., Markewitz, P.: Infrastructure issues of decoupled hydrogen/ electricity production with carbon capture and storage.

18/2010 Schumann, D., Simon, A.: Agent-based modeling of public acceptance in energy systems.

19/2010 Castillo, R.: Thermodynamic analysis of oxyfuel power plants with high temperature membrane for air separation.

20/2010 Castillo, R.: Technical evaluation of CO_2 compression and purification in CCS power plants

21/2010 Czyperek, M., Zapp, P., Bouwmeester, H. J. M., Modigell, M., Ebert, K., Voigt, I., Meulenberg, W.A., Singheiser, L., Stöver, D.: Gas separation membranes for zero-emission fossil power plants: MEM-BRAIN.

22/2010 Kronenberg, T.: What can post-Keynesian input-output models tell us about social sustainability?

23/2010 Kuckshinrichs, W., Kronenberg, T., Hansen, P.: Das CO_2-Gebäudesanierungsprogramm der KfW: Klimaschutz, Konjunktureffekt, Budgeteffekt für die Förderjahre 2005-2007.

24/2010 Schlör, H., Fischer, W., Hake, J.-Fr.: The history of sustainability: The importance of energy for the development of the idea and concept of sustainability.

25/2010 Kuckshinrichs, W.: Introduction to 'Infrastructure and Demography (InfraDem)'.

Research Reports 2010

01/2010 Birnbaum, U., Bongartz, R., Markewitz, P., Vögele, S, Linssen, J.: Energietechnologien 2050 – Fossil basierte Stromerzeugung, Wärmetransport, Brennstoffzellen.

02/2010 Martinsen, D., Weber, K.: Optimization of sustainability by means of IKARUS-FLP and Energy Indicators for sustainable Development (EISD).

03/2010 Schumann, D,: Scrutinizing the impact of CCS communication on the general and local public. Final project report.

04/2010 Bongartz, R., Markewitz, P., Zapp, P.: Prozesskette von CCS-Technologien: Technische Risiken und CO_2-Emissionen.

05/2010 Kuckshinrichs, W., Markewitz, P.: Kostenstrukturen von CCS-Technologien: Übersicht unter Berücksichtigung von CO_2-Reinheitsgraden und Lernkurven.

06/2010 Kuckshinrichs, W., Markewitz, P., Martinsen, D., Weber, K.: Der Optionswert von CCS-Technologien im Rahmen von CO_2-Reduktionsszenarien für Deutschland.

07/2010 Vögele, S.: The impacts of climate change on nuclear power plants and electricity supply in Europe.

Systems Analysis and Technology Evaluation at the Research Centre Jülich

Many of the issues at the centre of public attention can only be dealt with by an interdisciplinary energy systems analysis. Technical, economic and ecological subsystems which interact with each other often have to be investigated simultaneously. The group Systems Analysis and Technology Evaluation (STE) takes up this challenge focusing on the long-term supply- and demand-side characteristics of energy systems. It follows, in particular, the idea of a holistic, interdisciplinary approach taking an inter-linkage of technical systems with economics, environment and society into account and thus looking at the security of supply, economic efficiency and environmental protection. This triple strategy is oriented here to societal / political guiding principles such as sustainable development. In these fields, STE analyses the consequences of technical developments and provides scientific aids to decision making for politics and industry. This work is based on the further methodological development of systems analysis tools and their application as well as cooperation between scientists from different institutions.

Head: Jürgen-Friedrich Hake
Forschungszentrum Jülich
Institut für Energieforschung (IEF)
Systems Analysis and Technology Evaluation (IEF-STE)
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich
Tel.: +49-2461 61-6363
Fax: +49-2461 61-2540
Email : jfh@fz-juelich.de
Internet: www.fz-juelich.de/ief-ste