



## MASTERARBEIT

# Dynamisches Gerätebestandsmodell – Ein Vergleich von Austauschprogrammen und Standards am Beispiel österreichischer Kühlschränke

Ausgeführt am Institut für

Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

unter der Anleitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Haas

und

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Wolfgang Prügler

durch

Dipl.-Ing. Daniel Josef Asch

Berthold Fischer-Lände 2  
3160 Traisen

## **Danksagung**

An dieser Stelle sei es angebracht meinen Dank all jenen Persönlichkeiten kund zu tun, welche mich beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt und geleitet haben. Für die Schaffung eines vorbildlichen Diskussionsklimas, den essentiellen und für den Erfolg dieser Arbeit verantwortlichen Diskussionen, gilt mein persönlicher Dank Prof. Reinhard Haas, DI Wolfgang Prügler sowie DI Andreas Müller.

Alfred und Waltraud Goiser sorgten für ideales privates Umfeld, in welchem sich Edith Goiser in jeder Phase meines Studiums als eine einzigartige und besondere Stütze erwies. Hierfür möchte ich meinen aufrichtigen Dank zum Ausdruck bringen...

...ein „DANKESCHÖN“ vom ganzen Herzen!

## **Abstract**

A sustainable energy system needs a high level of energy efficiency. To increase energy efficiency and mobilise electricity savings in Austria's household sector some application substitution programs based on financial subsidies were realized historically. The short and long term electricity savings generated by substitution programs and are compared in this paper and their dynamic development is analysed. The examination is based on a dynamic stock model for freezers in Austria. Different scenarios were generated and their comparison yield important implications.

## **Kurzfassung**

Die sich rasant entwickelte Industrialisierung und die damit einhergehenden Emissionen von klimaaktiven Gasen, die zunehmende Abhängigkeit vom Ausland bezüglich der Importe fossiler Energieträger und der permanent steigende Energieverbrauch sind nur einige Schwerpunkte der aktuellen Diskussion der Expertise und Politik.

In einem nachhaltigen Energiesystem ist der Einsatz von effizienten Technologien in allen Wirtschaftssektoren unerlässlich. Aus diesem und anderen Gründen arbeitet Österreich an der Erhöhung der Endenergieeffizienz in allen Verbrauchersektoren um Energieeinsparpotentiale zu realisieren – getrieben von der Erfüllung des Kyotozieles und den vorgegebenen Zielen der Europäischen Union.

Begründet durch den veralteten – ineffizienten – Gerätebestand in Österreichs Haushalten existiert auch im Haushaltssektor ein beträchtliches unerschlossenes Energieeinsparungspotential. Um dieses teilweise zu mobilisieren, werden als eine Maßnahme Gerätetauschaktionen im Haushaltssektor diskutiert. Die Idee ist, dass mit finanziellen Zuschüssen die Investitionsentscheidung der Konsumenten zu Gunsten neuer (effizienter) Geräte beeinflusst wird, sodass es zu einem frühzeitigem Austausch der Geräte und einem direkten Eingriff in die Altersstruktur des Gerätebestandes kommt.

In dieser Arbeit wird durch einen dynamischen Modellansatz die langfristige Sinnhaftigkeit – hinsichtlich Stromeinsparung und Wirtschaftlichkeit – frühzeitiger Gerätetauschaktionen und verpflichtenden Standards im Haushaltssektor, am Beispiel von Kühlschränken in Österreich, analysiert. Dabei werden in verschiedenen Szenarien Stromeinsparungen abgebildet und einander verglichen.

Um bei der Realisierung eines frühzeitigen Austauschprogramms „Freerider“ zu unterbinden, wird eine ideale Austauschstrategie erarbeitet, welche aus der Untersuchung der möglichen und erzielten Einsparungen abgeleitet wird.

Weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Erstellung und Implementierung eines Gerätebestandmodelles, welche auf jährlicher Basis den kumulierten Stromverbrauch eines Gerätebestandes (Kühlschränke in Österreich) abbildet und den aktiven Einfluss eines frühzeitigen Austauschprogramms von Geräten analysieren lässt. Dabei finden nicht nur die nach der typischen Lebensdauer getauschten Geräte Berücksichtigung, sondern auch jene, die neu in den Gerätebestand eingetreten sind. Da das Gerätebaujahr eines Gerätes deutlich mit seinem Stromverbrauch korreliert, rückt das Baujahr für die gesamte Simulation in den engeren Fokus der Betrachtung.

Aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Szenarien ist deutlich zu erkennen, dass der frühzeitige Austausch eines Gerätes kurzfristig zu Stromeinsparungen führt, diese langfristig jedoch deutlich geringer ausfallen. Es wird eine Analyse der Wirkungsweise und Tragweite hinsichtlich der möglichen Stromeinsparungen erstellt und die zeitliche Entwicklung der Einsparungen näher beleuchtet.

## Summary

The fast increase in energy consumption, resulting in rising greenhouse gas emission, increasing dependence of imported fossil fuels, are only few reasons for current discussion among policy makers and energy experts.

The use of highly energy efficiency technologies in every sector of the economy is a prerequisite for a sustainable energy system. Austria tries to increase of energy efficiency in the whole economy to mobilise of energy saving potentials. Last but not least the obligate Kyoto emission reduction goal is also a driver to improve energy efficiency in Austria.

The old and inefficient stock of applications in the household sector in Austria yields a high electricity saving potential. Discussion focuses on measures to mobilise electricity saving potential by implementing an application substitution program. The idea is to influence the consumer decision with a financial subsidy to purchase new, highly efficient applications. In turn, this measure causes a big and direct change in the age distribution of the existing applications.

The effects of substitution programs of applications and Standards for applications are the core of this analysis. The examination is based on a dynamic modelling approach to investigate the long and short term effects of the mentioned policies with regard achieved electricity savings. Different scenarios and the corresponding electricity use will be compared.

To prevent “freeriders” in the application substitution program it is necessary to find an ideal strategy of substitution. Therefore a special analysis of mobilised electricity savings generated by the substitution of an application will be performed.

Analyses within this paper are performed by an application stock model. This model calculates the cumulative electricity use of the whole stock of freezers in Austria on annual time resolution. With this model it is possible to analyse the influence of an application substitution program. The dynamic evolution of the application stock is influenced by new (old application leaves and a new ones come in the stock when the typical lifetime is over) and the additional applications (the whole stock increases in time). There is a significant correlation of the year of construction and the electricity consumption of an application witch is an important fact for the whole examination.

The results of the different scenarios clearly show that application substitution programs realize only short term electricity savings. The long term effect is increased electricity consumption. Analysing both short and long term effects of electricity consumption resulting from demand side policies focusing on standards will be used as a comparison.

## **Kurzbericht**

Für ein nachhaltiges Energiesystem ist ein hohes Maß an Energieeffizienz unerlässlich. Um die Energieeffizienz in österreichischen Haushalten zu erhöhen und insbesondere die vorhandenen Stromeinsparpotentiale zu mobilisieren, wurden finanziell gestützte Geräteaus-tauschprogramme realisiert. In dieser Arbeit werden die kurz- und langfristigen Strom-einsparungen von Geräteaus-tauschprogrammen jenen von verpflichtenden Geräte Standards gegenüber gestellt und deren zeitliche Entwicklung beleuchtet.

Die Untersuchung basiert auf einem dynamischen Gerätebestandsmodell am Beispiel für Kühlschränke in Österreich.

Eine Reihe von Szenarien zeigt deutlich, dass der frühzeitige Gerätetausch kurzfristig zu deutlichen Stromeinsparungen führt, langfristig jedoch sogar ein kumulierter Strommehrverbrauch im Vergleich zum BAU-Szenario resultiert. Die dabei entstehenden – auf die Ein-sparung bezogenen – Kosten des Austauschprogramms steigen überproportional je später der Gerätetausch vollzogen wird. Durch das Austauschprogramm kommt es zu einem direkten Eingriff in die natürliche Altersstruktur des Gerätebestandes und dessen Entwicklung. Daraus resultiert eine Änderung der privaten Investitionszyklen.

Die Einführung von verpflichtenden dynamischen Gerätestandards hingegen mobilisieren langfristig und nachhaltig Stromeinsparpotentiale. Eine Zeitspanne im Ausmaß der typischen Gerätelebensdauer reicht bereits aus, um nach der Einführung der Standards den kumulierten Gerätestromverbrauch um 60 % – bezogen auf ein BAU-Szenario – zu senken.

# Inhalt

1	Allgemeines .....	1
1.1	Energie- und Stromverbrauch in Österreich .....	1
1.2	Aktuelle Situation .....	3
1.3	Motivation.....	4
2	Methodik.....	5
2.1	Szenarienbeschreibung .....	5
2.1.1	BAU-Szenario .....	5
2.1.2	Referenz-Szenario .....	5
2.1.3	HAB (Historical always Best)-Szenario.....	6
2.1.4	ATP (Aus-Tausch-Programm)-Szenario .....	6
2.1.5	Standard-Szenario .....	6
2.2	Modell.....	7
2.2.1	Modellbeschreibung .....	7
2.2.2	Inputparameter.....	8
2.2.3	Grundlagen der Implementierung .....	9
2.3	Aufbau der Berechnung.....	10
2.3.1	Bestandsmodell .....	10
2.3.2	Reboundeffekt .....	11
2.3.3	Gesamtstromverbrauch des Gerätebestandes .....	12
2.3.4	Verbrauchsentwicklung.....	13
2.4	Inputparameterbestimmung .....	16
2.4.1	Stromverbrauchsentwicklung eines Kühlschranks .....	16
2.4.2	Altersstruktur des Gerätebestandes von Kühlschränken in Österreich .....	24
2.4.3	Neugeräte.....	25
2.4.4	Austauschprogramm - Tauschstrategie .....	25
2.4.4.1	Allgemeine Untersuchung von Austauschaktionen .....	25
2.4.4.2	Restriktionen des implementierten Geräte austauschprogramms .....	35
2.4.5	Standard.....	36
2.4.6	Parameterliste .....	36
3	Ergebnisse.....	37
3.1	Referenz-Szenario.....	37
3.2	HAB-Szenario.....	38
3.3	BAU-Szenario.....	39
3.4	ATP-Szenario .....	41

3.5	Standard-Szenario .....	43
3.6	Vergleich der Szenarien.....	44
3.7	Gegenüberstellung der Stromverbrauchsentwicklung resultierend aus den erstellten Szenarien.....	46
3.8	Einsparungen durch Geräteaustauschprogramme und verpflichtende Standards .....	46
3.8.1	Stromeinsparung durch ATP .....	47
3.9	Kostenbetrachtung .....	49
3.9.1	Verpflichtende Standards .....	50
3.9.2	Austauschprogramm.....	50
4	Schlussfolgerung.....	53

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kumulierter Stromendverbrauch nach Sektoren in Österreich vom Jahr 1970 bis 2006 (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006).....	1
Abbildung 2: Prozentuelle Aufteilung des historischen Stromverbrauchs in Österreich nach Sektoren (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006).....	2
Abbildung 3: Aufteilung des Stromendverbrauches in Österreich nach Sektoren im Jahr 2006 (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006).....	3
Abbildung 4: Stromendverbrauch der privaten Haushalte in Österreich und die jährlichen Stromverbrauchssteigerungsraten (bezogen auf das Vorjahr) von 1988 bis 2006 (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006).....	4
Abbildung 5: Graphische Darstellung - Blockbild - des Aufbaues des implementierten Programms .....	7
Abbildung 6: Graphische Darstellung der fundamentalen Implementierungsbedingung des „natürlichen Austausches“ von Geräten nach Ablauf der für das Gerät typischen Lebensdauer. ....	9
Abbildung 7: Zweidimensionale Implementierungen der Berechnung des Gerätebestandes und der zeitlichen Bestandsentwicklung unter Berücksichtigung der zu tauschenden (natürlicher Gerätetausch) und zusätzlich neu in den Bestand eintretenden Geräte.....	10
Abbildung 8: Quantitative Bestimmung der zeitlichen Entwicklung des Stromverbrauches durch exponentielle Regressionsanalyse empirischer Daten (Bertoldi et al., 2006).....	16
Abbildung 9: Extrapolation der Energieverbrauchsentwicklung einer Technologie (Kühlschrank) als Funktion der Zeit. Vergleich der BEST- and AVERAGE-Technologie – Effizienteste vs. Durchschnittliche. Graphische Darstellung der empirischen Quelldaten (Bertoldi et al., 2006) für die Extrapolation. ....	23
Abbildung 10: Angenommene Altersstruktur der Kühlschränke in Österreich im Jahr 2006. Der Gesamtbestand an Kühlschränken beträgt 3,4 Mio. Geräte.....	24
Abbildung 11: Gegenüberstellung der Stromeinsparung von Geräten, welche sich am Ende der Lebensdauer befinden - natürlicher Austausch – (linke Seite des Bildes) und jenen, welche frühzeitig getauscht werden (rechte Seite des Bildes) .....	26
Abbildung 12: Graphische Darstellung der Nettostromeinsparung durch Gerätetausch. Skizziert sind die kurzfristige Stromeinsparung und der langfristige Mehrverbrauch an Strom bei einem frühzeitigen Austausch eines Gerätes.....	27
Abbildung 13: Graphische Darstellung der Stromnettoeinsparung eines frühzeitigen Gerätetausches als Funktion von $\Delta t$ (=Differenz der Baujahre der beteiligten Geräte).....	30
Abbildung 14: Graph der ersten Ableitung der Nettostromeinsparungsfunktion. ....	33
Abbildung 15: Graphische Abbildung der idealen Austauschzeitspanne $\Delta t^*$ um die Nettoeinsparung einer Gerätetauschaktion zu maximieren. Die ideale Zeitspanne wird als Funktion der Lebensdauer dargestellt. ....	34

Abbildung 16: Graphische Darstellung der simulierten Gerätetauschaktion im Jahr 2010. Absolute und relative Geräteanzahl - bezogen auf den Bestand des jeweiligen Jahres – der getauschten Geräte. Absoluter und relativer Anteil der getauschten Geräte, welche durch BEST-Geräte substituiert wurden. Jüngere und ältere Geräte sind zur Tauschaktion nicht zugelassen.....	35
Abbildung 17: Kumulierter Stromverbrauch von Kühlschränken in Österreich im Referenz-Szenario. Dieses Szenario wird als minimaler Stromverbrauch und somit als technische Grenze definiert.....	37
Abbildung 18: Kumulierter Stromverbrauch für Kühlschränke in Österreich im HAB-Szenario. Als Vergleich ist auch der kumulierte Stromverbrauch im Referenz-Szenario – technische Grenze – dargestellt.....	38
Abbildung 19: Kumulierter Stromverbrauch für Kühlschränke in Österreich im BAU-Szenario. Als technische Grenze – minimaler Stromverbrauch – wird der Stromverbrauch im Referenz-Szenario als Vergleichswert dargestellt.....	39
Abbildung 20: Kumulierter Stromverbrauch der Kühlschränke in Österreich im ATP- und Referenz-Szenario .....	41
Abbildung 21: Kumulierter Stromverbrauch von Kühlschränken in Österreich im Standard-Szenario, welcher nach der Einführung der verpflichtenden Standards deutlich sinkt. Als Vergleich ist der kumulierte Stromverbrauch des Referenz-Szenarios dargestellt.....	43
Abbildung 22: Bestandsentwicklung über der Zeit (primäre y-Achse). Vergleich von BAU und ATP-Szenario bezüglich der Neugeräte pro Jahr (sekundäre y-Achse) bei gleichem konstanten zusätzlichen Geräten/Jahr .....	44
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Stromverbrauchsentwicklung. Ein Vergleich der Stromverbrauchsentwicklung von Standard, BAU- und ATP-Szenario über der Zeit. Als Referenzwerte sind die Technische Grenze (jährliche Totalsubstitution) und der Stromverbrauch, hätte man immer nur die Besten (auch historisch) als Neugeräte zugelassen, dargestellt .....	46
Abbildung 24: Stromeinsparungen durch das ATP und Standards im Vergleich zum BAU-Szenario unter der Berücksichtigung der Konsumentenentscheidung, ob nach der Lebensdauer ein durchschnittliches oder effizientes Gerät installiert wird.....	47
Abbildung 25: Graphische Darstellung der Kosten für die Totalsubstitution der Kühlschränke in Österreich bei unterschiedlichen Jahren des Gerätetausches.....	51
Abbildung 26: Graphische Darstellung der Kosten der Stromeinsparung, bezogen auf die über die Lebensdauer erzielten Stromeinsparungen in Abhängigkeit der eingesparten Strommenge.....	52

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Parameterliste der Inputparameter – diese werden jedem erstellten Szenario zugrunde gelegt.....	36
--	----

## Abkürzungen

ATP	(Geräte)-Austauschprogramm
AVERAGE, average-eff	durchschnittlich effizient
BEST, best-eff	maximal effizient
BAU	Business as Usual
TD	Thermodynamik
ges	gesamt
reg	Regression
$t_0$	Jahr der Einführung von Standards <sup>1</sup>
	Jahr der einmaligen Geräteauschaktion
	Startzeitpunkt der Simulation
L	typische Lebensdauer eines Gerätes
n	Geräteanzahl
i	natürliche Zahl, verwendet als diskrete Laufvariable
t	Zeitvariable
$\eta_{\text{Best}}$	Wirkungsgrad des effektivsten Gerätes
$\eta_{\text{Average}}$	Wirkungsgrad des durchschnittlich-effektiven Gerätes
k	multiplikative Konstante
$\tau$	Zeitparameter der Stromverbrauchsentwicklung
Q	Energiemenge
$\varepsilon$	Arbeitszahl der Kältemaschine
W	Stromverbrauch der Kältemaschine
S	Stromeinsparung pro Gerät
$\Delta t$	Zeitspanne von Geräteinstallation bis zum Gerätetausch
$\Delta t^*$	Idealer Austauschzeitpunkt
$y_{\text{reg}}$	Funktionsvariable der Regression
$k_{\text{reg}}$	Konstante der Regression
$\eta_{\text{Average}}$	Parameter der Regression
$k_{\text{TD}}$	Thermodynamisch minimaler Stromverbrauch
$E_{\text{ges}}$	kumulierter Stromverbrauch des Gerätebestandes
$p_{\text{el}}$	Haushaltsstrompreis
$\Delta p_{\text{el}}$	Haushaltsstrompreisänderung zum Vorjahr
GDP	Bruttoinlandsprodukt
$\Delta \text{GDP}$	Bruttoinlandsproduktänderung zum Vorjahr
e	Energiebedarfsentwicklung der Kühlschränke
$\alpha$	Preiselastizität
$\beta$	Einkommenselastizität
$\xi$	natürliche Zahl, verwendet als diskrete Laufvariabel
$n_{\text{tausch}}$	getauschte Geräte
$n_{\text{zusätzlich}}$	zusätzliche Geräte
x	Baujahr der Geräte
HAB	Historical Always Best – Historisch bereits das (beste) effizientes Gerät
z	Zinssatz

---

<sup>1</sup> Variable wird bei diversen Berechnungen mehrmals verwendet. Je nach Thematik Verwechslungen sind auf Grund der Eindeutigkeit der Berechnung jedoch auszuschließen.

# 1 Allgemeines

## 1.1 Energie- und Stromverbrauch in Österreich

Der historische Beginn der Industrialisierung ging mit einem kontinuierlichen Anstieg der Schadstoffemissionen einher und führt noch heute zu klimaändernden Treibhausgasdichten in der Atmosphäre der Erde. Der anhaltende Klimawandel und dessen gesellschaftlichen Folgen – begünstigt durch die weltweit steigenden Klimagasemissionen – führte bereits in vergangenen Jahren zu heftig geführten Diskussionen in Politik- und Expertengremien. Da der größte Teil der Emissionen auf unser Energiesystem zurückzuführen ist – welches großteils auf fossilen Energieträgern basiert – kommt es fort an zu einer kritischen Betrachtung des Energiesystems. Diese Kritik wird durch das völkerrechtlich bindende Kyoto-Protokoll und insbesondere durch dessen Reduktionsziele geschnürt.

Weiters stellen die aktuellen Entwicklungen des Rohölpreises und die damit korrelierte Ressourcenknappheit fossiler Energieträger einen weiteren Nährboden für die Kritik an implementiertem Energiesystem dar.

Speziell in der Europäischen Union befinden sich die wachsende Importabhängigkeit von fossilen Energieträgern und der permanent ansteigende Energieverbrauch im Fokus der Expertise. Der Bemühung Österreichs durch den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern den kohlenstoffdioxid-behafteten Anteil der Energiebereitstellung zu minimieren, steht ein kontinuierlicher Anstieg des Endenergieverbrauches gegenüber.

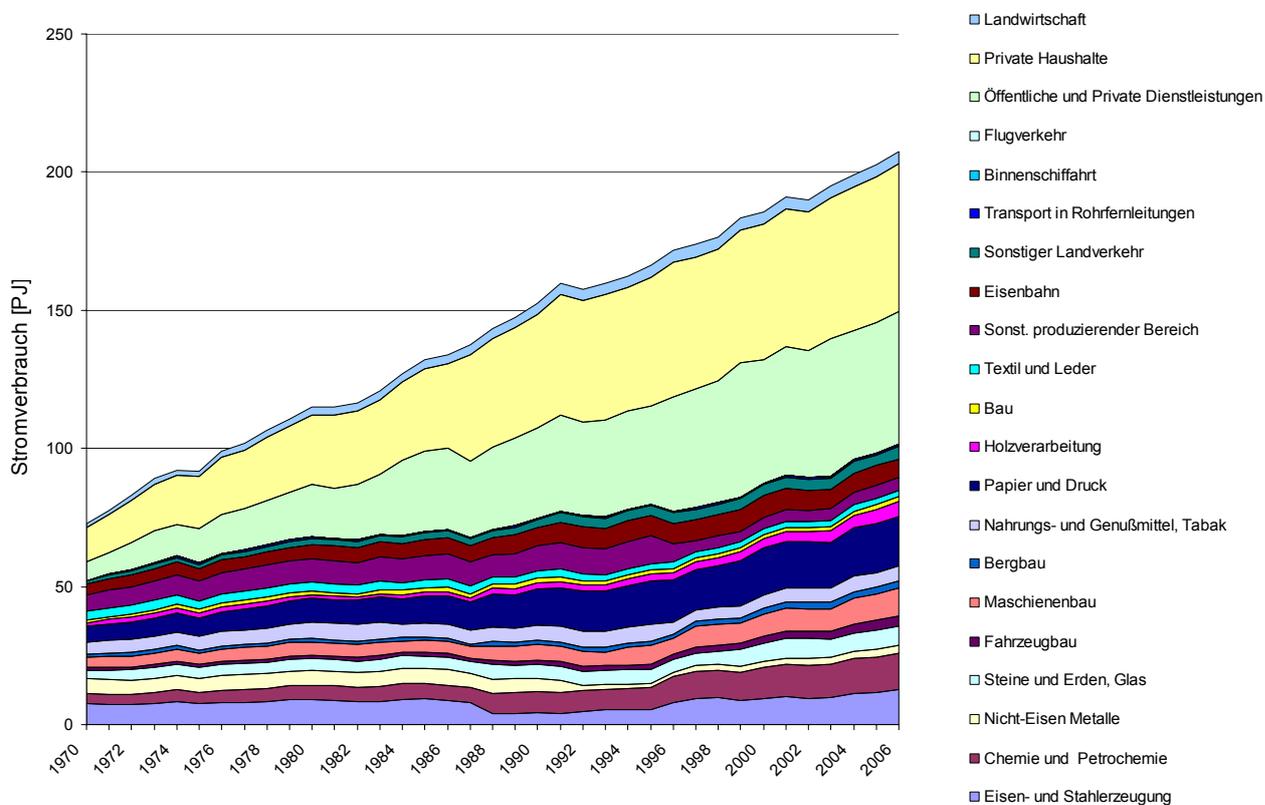


Abbildung 1: Kumulierter Stromendverbrauch nach Sektoren in Österreich vom Jahr 1970 bis 2006 (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006)

Beispielsweise wurden in Österreich in den vergangenen Jahren durch energiepolitische Maßnahmen Rahmenbedingungen geschaffen, die eine rapide Markteinführung und Marktdurchdringung von erneuerbaren Technologien zur Strombereitstellung ermöglichen sollten. Daraus resultierte eine Erhöhung der absoluten Bereitstellung an elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen und führte dennoch, durch den anhaltenden Stromverbrauchszuwachs – siehe Abbildung 1 – relativ betrachtet, zu keinem Anstieg der erneuerbaren Energieträger im österreichischen Strommix. In Abbildung 1 wird der Trend zum höheren kumulierten Stromverbrauch in Österreich illustriert. Dabei hat sich der kumulierte Stromverbrauch in Österreich von 1977 bis 2006 mehr als verdoppelt.

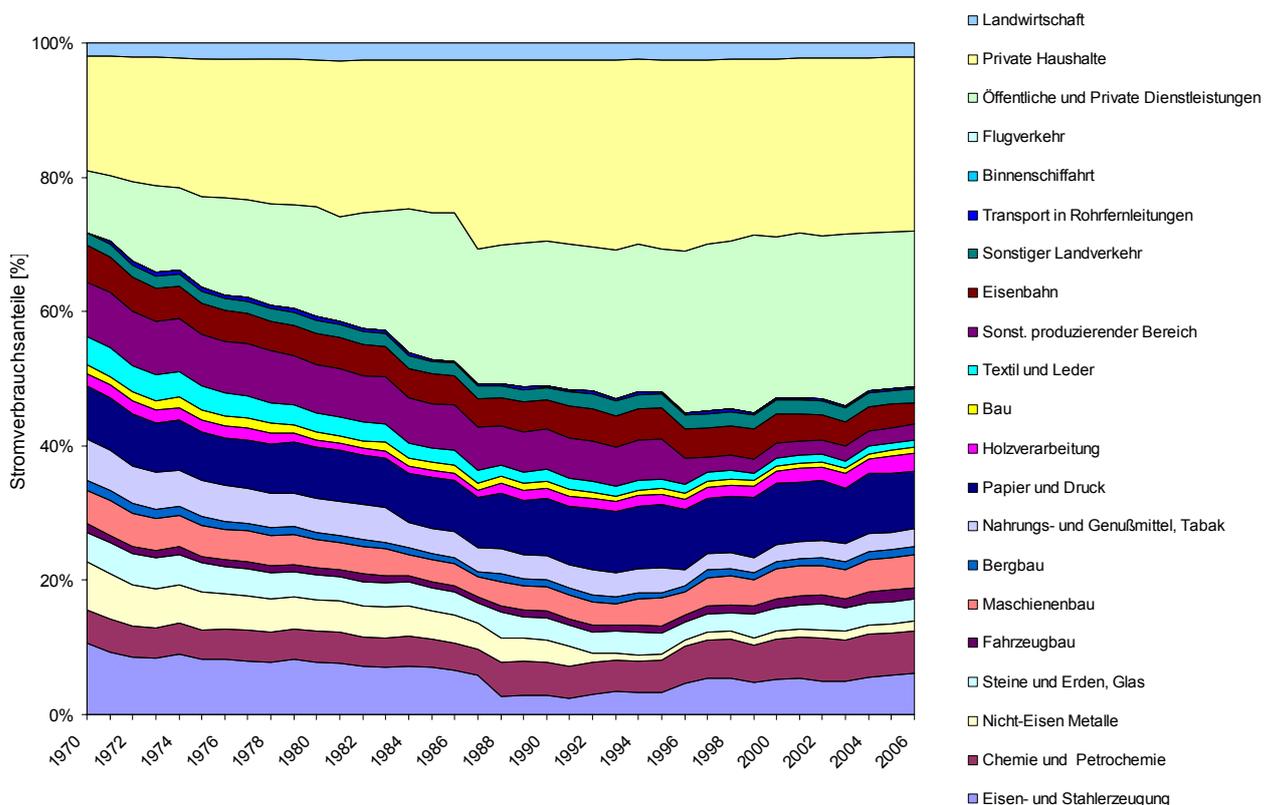


Abbildung 2: Prozentuelle Aufteilung des historischen Stromverbrauchs in Österreich nach Sektoren (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006)

Wie Abbildung 2 verdeutlicht, änderte sich die prozentuelle Aufteilung des Stromverbrauches nach unterschiedlichen Sektoren in Österreich im Laufe vergangener Jahre von 1970 - 2006. Dabei ist ein ausgeprägter prozentueller Anstieg am Stromverbrauch im Dienstleistungssektor zu erkennen.

Dem Sektor der privaten Haushalte war bereits zu Beginn der betrachteten Zeitperiode (1970 - 2006) ein erheblicher Anteil des kumulierten Stromverbrauches zu zuschreiben. Auch heute noch ist dieser Sektor für den größten Anteil am kumulierten Stromverbrauch in Österreich verantwortlich.

## 1.2 Aktuelle Situation

Betrachtet man die derzeitige Situation des Stromendverbrauches in Österreich und legt die Aufteilung des Verbrauches nach Sektoren ins Zentrum des Interesses, stellt man fest, dass ein Viertel des kumulierten Stromverbrauches auf die privaten Haushalte entfällt – siehe Abbildung 3.

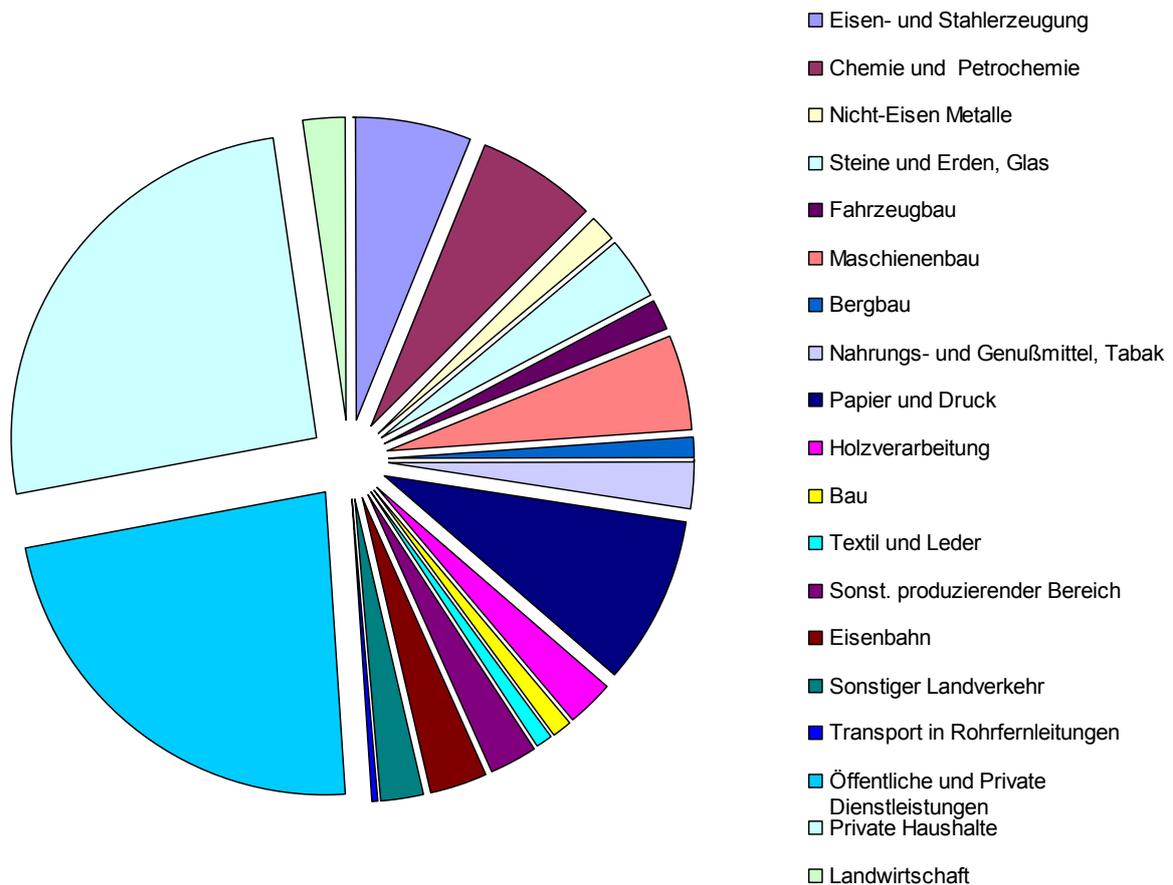


Abbildung 3: Aufteilung des Stromendverbrauches in Österreich nach Sektoren im Jahr 2006 (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006)

Dabei weist die zeitliche Entwicklung des Stromendverbrauches (=Stromverbrauch) der privaten Haushalte einen deutlichen Trend in Richtung höhere Verbrauchswerte auf. Der hohe Ausstattungsgrad an Geräten – teilweise über 100 % vgl. Biermayr, 1998 – im Haushalt und die anhaltende Nachfrage im Bereich der Medientechnik sind nur einige Gründe für diese Tatsache. Weiters werden in einem durchschnittlichen europäischen Haushalt 43,2 % des Endstromverbrauches „Weißer Ware“ (Bertoldi et al., 2006) – Gefrieren/Kühlen (22,4 %), Kochen/Geschirrspüler (10,3 %), Waschmaschine (10,5 %) – zugeschrieben.

In Abbildung 4 ist die zeitliche Entwicklung des kumulierten Stromverbrauches der Österreichischen Haushalte von 1988 – 2006 dargestellt. Es ist in diesem Zeitraum ein Anstieg von über 35 % am Gesamtstromverbrauch in diesem Sektor zu beobachten. Dies entspricht einer fiktiven jährlichen Steigerungsrate von 1,68 %/a.

Die tatsächlichen Stromendverbrauchssteigerungsraten der letzten Jahre – 2003 bis 2006 – liegen bei einem Zuwachs von ca. 1,8 %/a – siehe Abbildung 4.

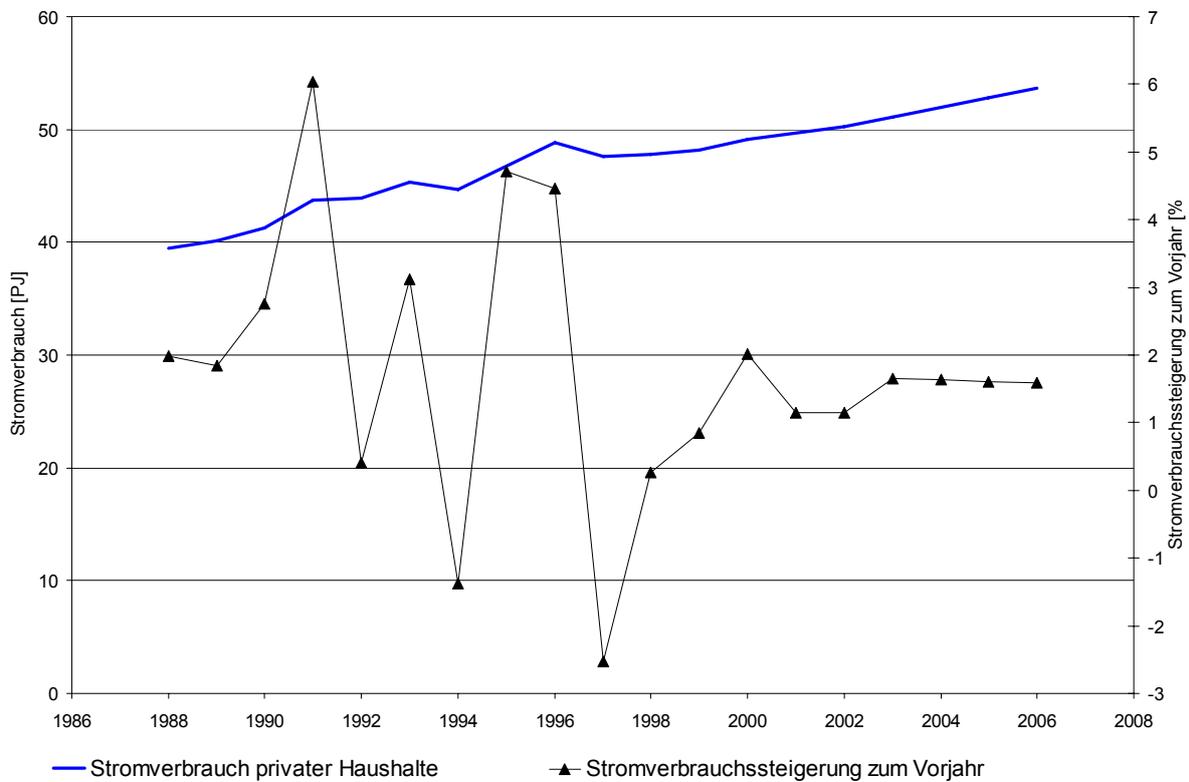


Abbildung 4: Stromendverbrauch der privaten Haushalte in Österreich und die jährlichen Stromverbrauchssteigerungsraten (bezogen auf das Vorjahr) von 1988 bis 2006 (Quelle: Statistik Austria Nutzenergieanalyse 2006)

Seitens der Politik wird versucht – nicht nur in Österreich sondern im ganzen Raum der Europäischen Union – durch energiepolitische Maßnahmen (verpflichtende Gerätestandards, finanziell gestützte Geräteaustauschprogramme, weiße Zertifikate, Labeling, Steuern, etc.) die Endenergieeffizienz in allen Sektoren zu steigern, mit dem Ziel, den Stromendverbrauch kurzfristig zu stabilisieren und langfristig zu senken.

### 1.3 Motivation

Um den Anteil am Endstromverbrauch in Österreich zu reduzieren, kam es in den vergangenen Jahren vereinzelt zu Geräteaustauschaktionen im Haushaltsbereich. Dabei wird – über finanzielle Anreize – die Investitionsentscheidung der Konsumenten dahingehend beeinflusst, dass diese frühzeitig – vor Ende der natürlichen Lebensdauer der Geräte – Investitionen für effizientere Geräte zeitlich vorziehen, sodass es zu einer Reduktion des Stromverbrauches im Sektor der privaten Haushalte kommt.

Wie groß diese Stromeinsparungen – kurz- und langfristig – tatsächlich sind und wie sich diese Einsparungen zeitlich entwickeln ist Hauptgegenstand dieser Arbeit. Hierfür werden die erzielten Stromeinsparungen, jenen resultierend aus verpflichtenden Gerätestandards, gegenübergestellt.

## **2 Methodik**

Für die Untersuchung der Auswirkung und Effektivität von verpflichteten Standards und Gerätetauschaktionen im Haushaltsbereich hinsichtlich der möglichen einzusparenden Strommenge wird ein computerbasiertes Tabellenkalkulationsprogramm erstellt. Mit diesem Programm ist es möglich die unterschiedlichen Wirkungsweisen und Auswirkungen auf den Gerätebestand einer Technologie (am Beispiel für Kühlschränke in Österreich) von frühzeitigen Geräteaustauschprogrammen (ATP) und verpflichtende Gerätestandards im Zuge einer Simulation unterschiedlicher Szenarien bis 2050 darzustellen und zu analysieren. Das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft-Excel bietet im Bezug auf eine schnelle und einfache visuelle Darstellung der Ergebnisse gewisse Vorteile. Weiters erlaubt das Visual Basic-Zusatzpaket von Excel, die in Tabellenform abgelegten Daten der Berechnung durch die Programmierung von Makros (Subroutinen) gezielt zu manipulieren und um notwendige schleifenerforderliche Berechnungen im Hintergrund des Programms zu erweitern. Die Visual Basic-Toolbox enthält wertvolle Steuerelemente – graphische Steuerbuttons – welche nach deren Programmierung ein gezieltes Aufrufen der Subroutinen und somit eine einfache Art der Graphik User Interphase-Steuerung durch das zugrunde liegende Programm ermöglicht. Für die Steuerung des Programms und das Erstellen von diversen Szenarien sind somit keine programmiertechnischen Kenntnisse zwingend von Nöten, sondern erlaubt jedem User einen einfachen Zugang und Nutzen der zugrunde liegenden Berechnungsalgorithmen des Programms.

Um qualitative und quantitative Aussagen über die Wirkungsweise und Tragweite von frühzeitigen Geräteaustauschprogrammen und verpflichtenden Standards – in einem bereits existierenden Gerätebestand – hinsichtlich der Möglichkeit der kumulierten Stromeinsparungen zu machen, werden fünf unterschiedliche Szenarien erstellt. Anschließend kommt es zu einer direkten Gegenüberstellung der jeweiligen kumulierten Stromverbrauchsentwicklung dieser Szenarien.

### **2.1 Szenarienbeschreibung**

#### **2.1.1 BAU-Szenario („Business as Usual“-Szenario**

In diesem Szenario wird der kumulierte Stromverbrauch des existierenden Gerätebestandes (Kühlschränke in Österreich) simuliert, ohne energiepolitische Maßnahmen (ATP oder verpflichtende Standards) zur Steigerung der Energieeffizienz zu implementieren. Das BAU-Szenario entspricht der derzeitigen Abbildung und künftiger möglicher Entwicklungen des kumulierten Stromverbrauches eines bestehenden Gerätebestandes.

#### **2.1.2 Referenz-Szenario**

Um qualitative und quantitative Aussagen über die erzielten kumulierten Stromeinsparungen machen zu können, wird dieses Szenario als Vergleichszenario erstellt. Der kumulierte Stromverbrauch dieses Szenarios dient in weiter Folge als Referenzwert für die nachstehenden Szenarien zur Beurteilung der erzielten absoluten und relativen Stromeinsparungen. Der

kumulierte Stromverbrauch dieses Szenarios stellt die „technische“ Grenze<sup>2</sup> des minimalen kumulierten Stromverbrauches des Gerätebestandes dar.

Für die Berechnung des kumulierten Stromverbrauches wird eine jährliche Totalsubstitution des vollständigen Gerätebestandes durch das effizienteste am Markt verfügbare Gerät vorausgesetzt.

### **2.1.3 HAB (Historical always Best)-Szenario**

Dieses Szenario dient hinsichtlich der Analyse von Stromverbrauchsentwicklungen in anderen Szenarien als weiteres Vergleichsszenario. Insbesondere die kumulierte Stromverbrauchsentwicklung dieses Szenarios ist für die qualitative und quantitative Beurteilung der Auswirkungen untersuchter energiepolitischer Maßnahmen (ATP und Standards) von besonderem Interesse.

In diesem Szenario wird unterstellt, dass seit Eintritt der Kühlschränke in den Markt Österreichs immer nur die effizientesten am Markt verfügbaren Geräte installiert worden sind. Diese Annahme entspricht weder der Realität noch gibt es einen praktischen Bezug hinsichtlich des existierenden Stromverbrauches der Kühlschränke in Österreich. Dennoch liefert dieses Szenario interessante Erkenntnisse bezüglich der politisch versäumten Möglichkeiten um den Stromverbrauch des Bestandes in Österreich im Vorhinein auf deutlich niedrigerem Niveau zu halten.

### **2.1.4 ATP (Aus-Tausch-Programm)-Szenario**

In diesem Szenario wird das BAU-Szenario bis zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_0$  durchlaufen. Im Jahre  $t_0$  kommt es zu der Implementierung einer Geräteaustauschaktion, welche im Vorfeld der Simulation explizit definiert wird – siehe Parameterbestimmung. Durch den Einfluss der Geräteaustauschaktion kommt es zur Änderung der natürlich entwickelten Altersverteilung der Geräte.

### **2.1.5 Standard-Szenario**

Ab einem bestimmten Zeitpunkt  $t_0$  wird das beste (effizienteste) am Markt verfügbare Gerät zur Bereitstellung der zugrunde gelegten Energiedienstleistung zu einem verpflichtenden Gerätestandard erhoben. Aus diesen Annahmen resultiert ein verpflichtender dynamischer – mit der Zeit sich ändernder – Gerätestandard. Die zeitliche Entwicklung des Gerätestandards ist somit gleich dem des effizientesten Gerätes. Ab dem Zeitpunkt  $t_0$  entsprechen alle neu in den kumulierten Gerätebestand eintretenden Geräte dem effizientesten verfügbaren Gerät.

---

<sup>2</sup> Dabei ist speziell in diesem Zusammenhang die „technische“ Grenze nicht mit jener der minimalen Energiemenge – errechnet nach den allgemein gültigen Gesetzen der Thermodynamik – zu verwechseln.

## 2.2 Modell

### 2.2.1 Modellbeschreibung

Das Modell liefert – diskretisiert auf Jahresbasis – die benötigte Strommenge einer bestimmten Technologie (Bsp.: Kühlschrank) in kumulierter Form für ein bestimmtes Land (Bsp.: Österreich). Grundsätzlich ist dieses Programm der Berechnung durch einfache Substitutionen der Eingangsdaten (Inputparameter) für jedes andere Land und Technologie (Waschmaschinen, Trockner, ...) leicht anzupassen. Die typische Lebensdauer einer Technologie – eines Gerätes (siehe unten) – stellt einen grundlegenden Eingangsparameter der Berechnung dar. Dies ermöglicht das Modell auch außerhalb des Haushaltssektors für Simulationen einzusetzen, sofern die übrigen Eingangsparameter des Modells technologiespezifisch angegeben werden können. Für nachstehende Untersuchungen ist es notwendig – siehe ATP-Szenario – das Baujahr der zu untersuchenden Geräte als fundamentalen Modellparameter in den Mittelpunkt der Betrachtung der Modellimplementierung zu stellen.

Das Modell errechnet unter bestimmten Annahmen den kumulierten Strombedarf einer Technologie. Weiters können die Auswirkungen auf den Stromverbrauch durch energiepolitische Maßnahmen, wie verpflichtende Gerätestandards und Austauschprogramme (ATP) von Geräten, untersucht werden. Dabei können Aussagen über die kurz-, mittel- und langfristigen Auswirkungen auf den kumulierten Strombedarf und dessen Entwicklung über die Zeit dieser Maßnahmen gemacht werden.

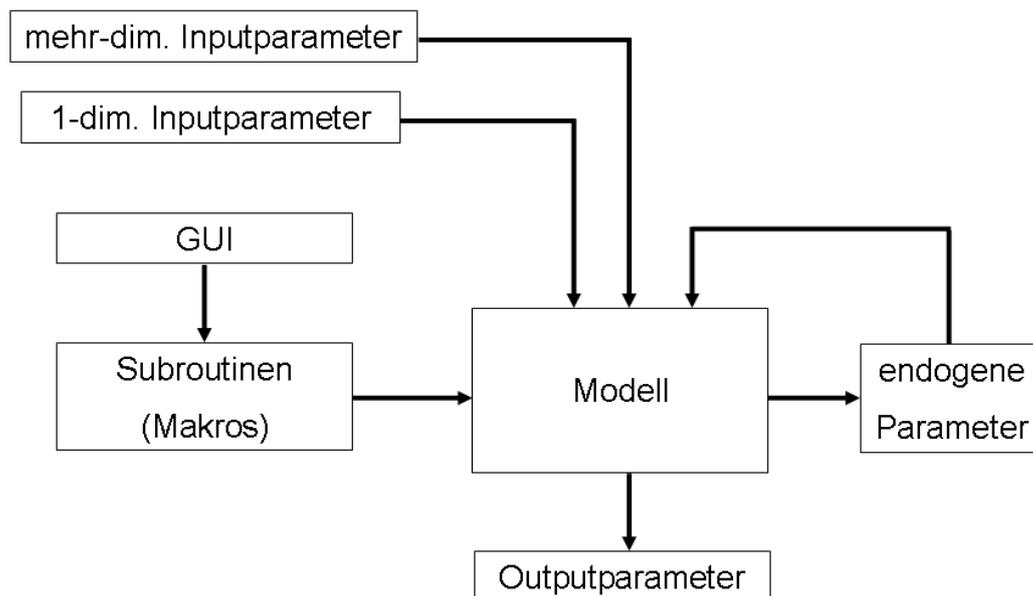


Abbildung 5: Graphische Darstellung - Blockbild - des Aufbaues des implementierten Programms

## 2.2.2 Inputparameter

Die Inputparameter des Modells sind länder- und technologiespezifisch und können bei unterschiedlichen Ländern und Technologien deutlich voneinander abweichen. Die Menge der Inputparameter zerfällt in zwei Teilmengen und es wird zwischen ein- und mehrdimensionalen Inputparameter differenziert.

- Eindimensionale Inputparameter
  - Abschreibungsdauer
  - Einkommenselastizität
  - Geräteeuppreis
  - Grenzwert für Stromverbrauchsentwicklung
  - Jahr der verpflichteten Standardeinführung
  - Jahr des Austauschprogramms
  - Jahr für die Kostenkurvenerstellung der Totalsubstitution
  - Jährliche Strompreissteigerung
  - Jährliches BIP-Wachstum
  - Konstante für Stromverbrauchsentwicklung – durchschnittliches Gerät am Markt
  - Konstante für Stromverbrauchsentwicklung – effizientestes Gerät am Markt
  - Lebensdauer
  - Lernrate
  - Preiselastizität
  - Strompreis im Jahr 2006
  - Zeitkonstante für Stromverbrauchsentwicklung
  - Zinssatz
  
- Mehrdimensionale Inputparameter
  - ATP-Daten – welche Geräte werden bei der ATP berücksichtigt
  - ATP-Daten – welche Geräte werden bei natürlichem Tausch nach der ATP wieder in effizienteste Geräte getauscht.
  - Bestand der Geräte von 1992 - 2006
  - Logische Variable – wird bei natürlichem Tausch nach dem ATP in effizienteste oder durchschnittlich effizienteste Geräte getauscht
  - Zusätzlich neue Geräte/Jahr

### 2.2.3 Grundlagen der Implementierung

Die Implementierung des Modells basiert auf einigen wenigen Restriktionen, welche per Definition festgehalten und im Zuge der Modellimplementierung als zwingende Algorithmen abgebildet werden.

1. Natürlicher Austausch
2. Baujahr ist gleich dem Jahr des Eintrittes in den Gerätebestand

- Natürlicher Austausch

Die Berechnung des kumulierten Stromverbrauches eines Gerätebestandes einer bestimmten Technologie basiert auf der strikten Annahme, dass ein Gerät nach dem Eintritt in den existierenden Gerätebestand und nach Ablauf der typischen (natürlichen) Lebensdauer der Austritt aus dem Gerätebestand folgt. Dieses ausgeschiedene Gerät wird jedoch zum selben Zeitpunkt des Austrittes durch ein neues Gerät substituiert und die entstandene Lücke im Gerätebestand somit wieder geschlossen. Die Bedingung des natürlichen Austausches stellt eine wesentliche und weittragende Eigenschaft des Modells dar.

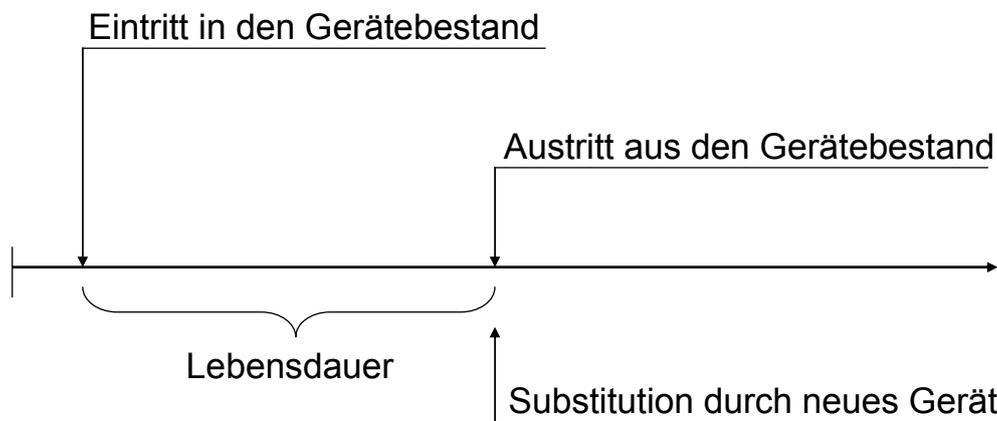


Abbildung 6: Graphische Darstellung der fundamentalen Implementierungsbedingung des „natürlichen Austausches“ von Geräten nach Ablauf der für das Gerät typischen Lebensdauer.

- Baujahr ist gleich dem Jahr des Eintrittes in den Gerätebestand

Aus den obigen Überlegungen folgt, dass das Baujahr der Geräte für die Bestandsentwicklung ein fundamentales Datum der Geräte und somit der gesamten Berechnung darstellt. Durch das Baujahr – welches das Jahr des Markteintrittes des Gerätes darstellt – und die Lebensdauer ist der Zeitpunkt des Austrittes aus dem Gerätebestand a priori definiert.

## 2.3 Aufbau der Berechnung

### 2.3.1 Bestandsmodell

Für die Implementierung der meisten nötigen Berechnungen stellt die tabellenförmige Oberfläche von Excel einen gewissen Vorteil dar. Zum Einem kann durch passend gewählte Datenanordnung für diese Problematik schnell ein Gefühl entwickelt werden wie sich Änderungen an dem Eingangsparameter auf das Endergebnis der Berechnung auswirken und zum Anderem wird die matrizenbasierte Berechnung gut unterstützt.

Im Folgenden wird die matrizenbasierte Berechnung an Hand des kumulierten Bestandes der Geräte und dessen Entwicklung über der Zeit illustriert.

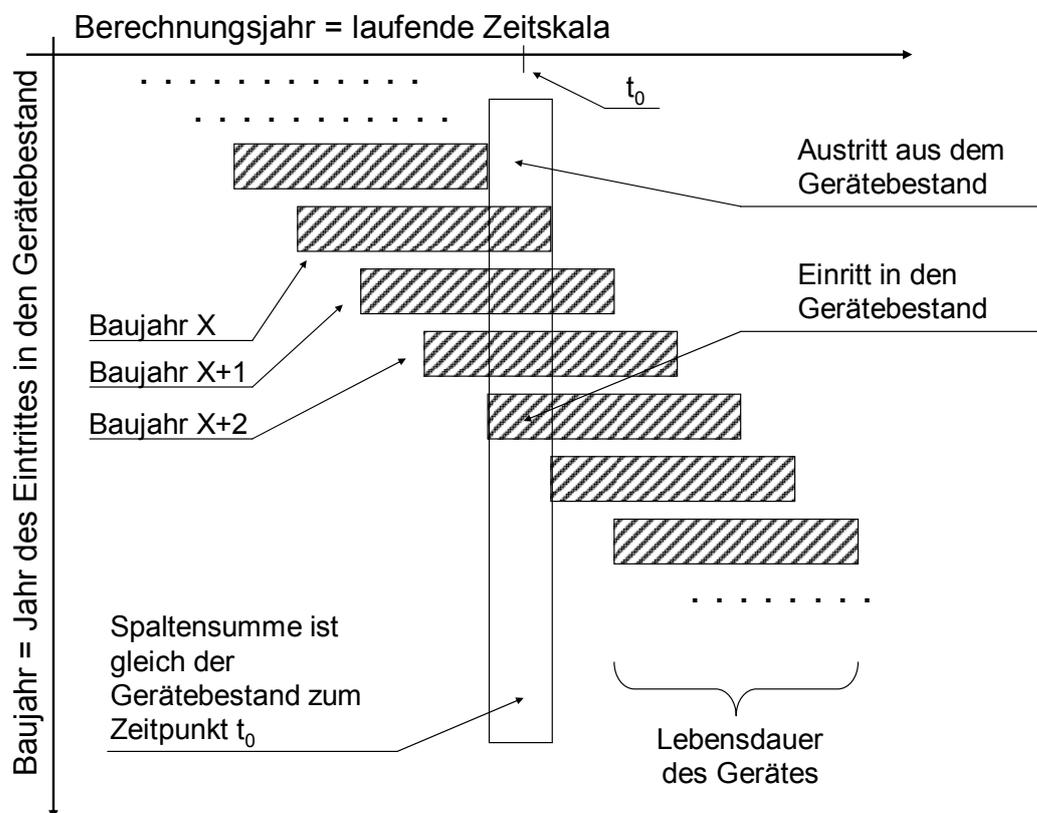


Abbildung 7: Zweidimensionale Implementierungen der Berechnung des Gerätebestandes und der zeitlichen Bestandsentwicklung unter Berücksichtigung der zu tauschenden (natürlicher Gerätetausch) und zusätzlich neu in den Bestand eintretenden Geräte

Der Vorteil der matrizenbasierten Berechnung liegt in dem leichten Zugriff der Elemente der zugrunde liegenden Matrix. Jedes Element einer Matrix kann mit nur zwei Iterationen manipuliert werden. Dabei dient eine der Iterationen der Zeilen- und die zweite der Spaltenindexinkrementierung.

Ein 2-dimensionaler Vektorraum ist Grundlage aller Berechnungen der Implementierungen des Modells. Einer der Einheitsvektoren stellt die laufende Zeitskala der Berechnung dar. Der Zweite dient als Baujahrmarker – dieser gibt auch Auskunft zu welchem Zeitpunkt ein bestimmtes Gerät in den Markt eingetreten ist (Baujahr = Eintrittsjahr in den Bestand, siehe oben).

In Abbildung 7 ist beispielhaft der Aufbau des Bestandes in Matrixform wiedergegeben. Zum Zeitpunkt  $t_0$  kommt es zu einem Austritt eines Gerätes nach dessen natürlicher Lebensdauer und zum selben Zeitpunkt – vgl. Abbildung 6 – ergänzt ein neues Gerät die entstandene Lücke im Gerätebestand. Der wesentliche und bedeutsame Unterschied der beteiligten Geräte dabei ist, dass das Baujahr des neuen Gerätes um die Lebensdauer jünger als das des ausgetauschten Gerätes ist. Dies führt – unter zugrunde gelegten Annahmen, siehe unten – zu einer Änderung des Stromverbrauches des Gerätes und somit zu einer Änderung des kumulierten Strombedarfs des vollständigen Gerätebestandes.

Die jährlichen Neugeräte setzen sich aus neu installierten Geräten und Geräten deren Lebensdauer abgelaufen ist – und darum getauscht werden müssen („natürlicher Austausch“) – zusammen.

$$n_{neu}(t) = n_{tausch}(t) + n_{zusätzlich}(t) \quad (1)$$

$n_{neu}$	neu installierte Geräte
$n_{tausch}$	ausgetauschte Geräte
$n_{zusätzlich}$	zusätzliche Geräte

Der jährliche Gerätebestand bildet die Summe aller im Gerätebestand installierten Geräte, deren Lebensdauer noch nicht abgelaufen ist und den neu Installierten.

$$n(t) = n_{neu}(t) + \sum_{i=1}^{Ld} n_{neu}(t-i) \quad (2)$$

$n$	Gerätebestand
$n_{neu}$	neu installierte Geräte, welche auf Grund ihrer noch nicht abgelaufenen Lebensdauer im Bestand sind

### 2.3.2 Reboundeffekt

Wird eine Energiedienstleistung zu geringeren Kosten angeboten, kommt es zu einer Erhöhung des Serviceniveaus. Je nach Energiedienstleistung ist diese Erhöhung unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei diversen Energiedienstleistungen (Bsp.: Beharrlichkeit – durch warmes Raumklima) ist auch eine Sättigung des Servicelevels zu beobachten.

- Longterm-Rebound

$$RB_{long} = \left( 1 + \frac{\Delta GDP(t, t-1)}{GDP(t)} \right)^\beta \quad (3)$$

$RB_{long}$	Longterm Rebound
GDP	Bruttoinlandsprodukt
$\Delta GDP$	Bruttoinlandsproduktänderung
$\beta$	Einkommenselastizität

In diesem Modell findet der Reboundeffekt als zweigliedriger Term Berücksichtigung. Dabei wird zwischen Longterm-Rebound (6) und Shortterm-Rebound (7) differenziert. Die Analyse des Austauschprogramms SAFE der Salzburger Stadtwerke 1989 (Haas et al., 1994) zeigte eine deutliche Neigung der teilnehmenden Konsumenten, bei der Wahl der neu installierten Geräte, zu größeren Geräten – gegenüber den zu Tauschenden – zu tendieren (Longterm-Rebound) (Reiter, 1991). Es wird somit berücksichtigt, dass der Strombedarf in Haushalten zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung vom aktuellen Kleinhandelsstrompreis abhängig ist (Shortterm-Rebound (Biermayr, 1999)).

- Shortterm-Rebound

$$RB_{short} = \left( 1 + \frac{\Delta p(t, t-1)}{p(t)} \right)^\alpha \quad (4)$$

$RB_{short}$	Shortterm Rebound
p	Kleinhandelsstrompreis
$\Delta p$	Kleinhandelsstrompreisänderung zum Vorjahr
$\alpha$	Preiselastizität

### 2.3.3 Gesamtstromverbrauch des Gerätebestandes

Summiert man den Stromverbrauch der einzelnen Geräte in einem bestimmten Jahr, so stellt diese Summe den Gesamtstromverbrauch des Gerätebestandes dar und unterliegt folgender Gesetzmäßigkeit

$$E_{ges}(t) = \sum_{i=0}^{L-1} e(t-i)n(t-i) \left(1 + \frac{\Delta p_{el}(t,t-1)}{p_{el}(t)}\right)^{\alpha} \left(1 + \frac{\Delta GDP(t,t-1)}{GDP(t)}\right)^{\beta} \quad (5)$$

$E_{ges}$	Gesamtstromverbrauch des Gerätebestandes
$L$	Lebensdauer der Technologie
$p_{el}$	Strompreis
$\Delta p_{el}$	Strompreisänderung zum Vorjahr
$GDP$	Bruttoinlandsprodukt
$\Delta GDP$	Bruttoinlandsproduktänderung zum Vorjahr
$\alpha$	Preiselastizität
$\beta$	Einkommenselastizität
$n$	Geräteanzahl
$e$	Energiebedarf der Technologie

### 2.3.4 Verbrauchsentwicklung

Für die Berechnung des kumulierten Stromverbrauches muss die Stromverbrauchsentwicklung  $e(t)$  der einzelnen Geräte über der Zeit angegeben werden. Diese Entwicklung des Stromverbrauches ist eine der bedeutsamsten Grundlagen der gesamten Berechnung des kumulierten Stromverbrauches und stellt somit einen Satz der einflussreichsten Inputparameter des Modells dar.

Durch technische Reifung und Weiterentwicklung – nicht zuletzt unter Einfluss – von energiepolitischen Maßnahmen seitens der Europäischen Union (Bsp.: Labeling) sind deutliche Änderungen im Stromverbrauch für die Dienstleistung Kühlen nachgewiesen. Der Energie Efficiency Index (EEI) von Kühlschränken weist in den vergangenen Jahren eine deutliche Verbesserung dieser Gerätegattung in der EU auf (Bertoldi et al., 2006).

$$e_{average-eff}(t) < e_{average-eff}(t-L) \quad (6)$$

$e_{average-eff}$	Stromverbrauch der durchschnittlich-effizienten Technologie
$L$	typische Lebensdauer

Um eine Verbrauchsentwicklung anzugeben scheint ein exponentieller Ansatz als zweckmäßig und ist auch als solcher im Modell implementiert. Dabei wird zwischen der Entwicklung des Hocheffizientesten (best-eff) und des Durchschnittlicheffizienten (average-eff) unterschieden.

$$e_{best-eff}(t) = k_{best-eff} \cdot e^{(-\eta_{best} \cdot (t-t_0))} + k_{TD} \quad (7)$$

$$e_{average-eff}(t) = k_{average-eff} \cdot e^{(-\eta_{average-eff} \cdot (t-t_0))} + k_{TD} \quad (8)$$

$e_{best-eff}$	Stromverbrauch der effizientesten (besten) Technologie
$e_{average-eff}$	Stromverbrauch der durchschnittlichsten Technologie
$t_0$	Startzeitpunkt der Simulation (2006)
$k_{best-eff}, k_{average-eff}$	multiplikative Konstanten
$\eta_{best-eff}, \eta_{average-eff}$	Zeitkonstanten der Entwicklung
$k_{TD}$	Thermodynamischer minimaler Stromverbrauch

Dieser Ansatz weist mehrere Vorteile auf, da dieser die hohen Verbrauchswerte der Kühlschränke der Vergangenheit als auch den aktuellen Stromverbrauch mit akzeptablem geringem Fehler abbildet. Die Analyse der Verbrauchswerte der Vergangenheit und der Gegenwart rechtfertigen diese Annahme – siehe unten. Die Verbrauchsentwicklung ist durch drei signifikante Parameter vollständig definiert.

- Multiplikative Konstante
- Zeitkonstante der Entwicklung
- Additiven Term

#### Multiplikative Konstante

Die multiplikative Konstante ist aus dem durchschnittlichen Verbrauchswert eines aktuellen – Baujahr 2007 – neuen Kühlschranks abgeleitet.

#### Zeitkonstante der Entwicklung

Die Zeitkonstante der Entwicklung beschreibt die Dynamik der Entwicklung des Stromverbrauches der zu untersuchenden Technologie. Da dieser Parameter in der Gleichung des Stromverbrauches als Exponent auftritt, weist bereits sein Vorzeichen besonderen Einfluss auf die

absolute Entwicklung des Stromverbrauches eines Gerätes und somit auf den kumulierten Stromverbrauch des Gerätebestandes auf.

### Additiver Term

Der Additive Term stellt eine Art der physikalischen und technischen Restriktion dar und repräsentiert den, nach Gültigkeit der physikalischen Grundgesetze, minimalen energetischen Aufwand zur Bereitstellung einer bestimmten Energiedienstleistung. Dieser Term resultiert durch einfache Grenzwertbildung.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{\text{average-eff}}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ k_{\text{average-eff}} \cdot e^{(-\eta_{\text{average-eff}} \cdot (t-t_0))} + k_{TD} \right\} = k_{TD} \quad (9)$$

$e_{\text{average-eff}}$	Stromverbrauch der durchschnittlichsten Technologie
$t_0$	Startzeitpunkt der Simulation (2006)
$k_{\text{average-eff}}$	multiplikative Konstanten
$\eta_{\text{average-eff}}$	Zeitkonstanten der Entwicklung
$k_{TD}$	Thermodynamischer minimaler Stromverbrauch

## 2.4 Inputparameterbestimmung

Für die Simulation von drei Szenarien werden an dieser Stelle die Inputparameter bestimmt. Diese quantitative Bestimmung der Parameter stützt sich auf empirische Daten und wird mit Hilfe von Zeitreihen und Regressionsanalysen durchgeführt.

### 2.4.1 Stromverbrauchsentwicklung eines Kühlschranks

Die Stromverbrauchsentwicklung der zugrunde gelegten Technologie (Kühlschrank) wird durch drei Parameter bestimmt (Zeitkonstante der Entwicklung, absoluter Parameter, thermodynamischer Mindest-Stromverbrauch) – siehe (7) und (8).

- Quantitative Bestimmung der zeitlichen Entwicklung des Stromverbrauches

Aus den empirischen Daten des Energy Efficiency Indexes (EEI) der vergangenen Jahre (Bertoldi et al., 2006) ist ein deutlicher Trend in Richtung höherer Effizienz für Kühlschränke in Europa erkennbar – siehe Abbildung 8.

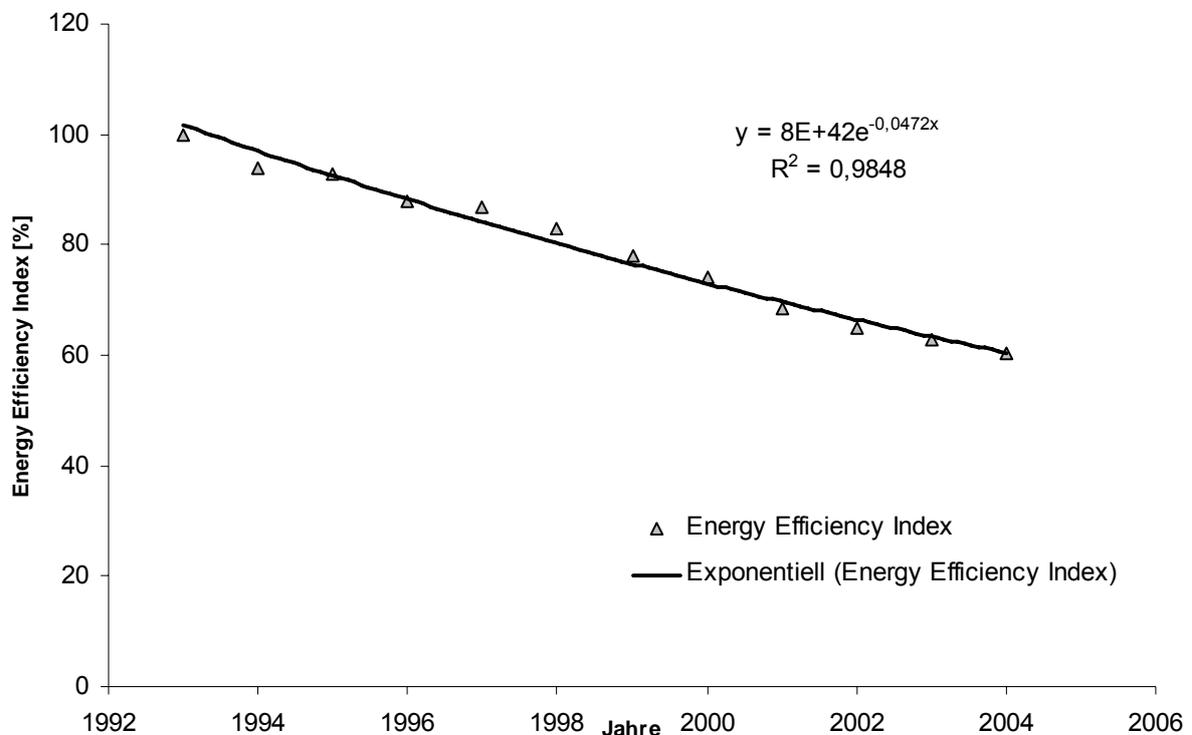


Abbildung 8: Quantitative Bestimmung der zeitlichen Entwicklung des Stromverbrauches durch exponentielle Regressionsanalyse empirischer Daten (Bertoldi et al., 2006).

Da die Verbrauchsentwicklung als exponentielle Funktion definiert wurde, ist durch eine Regressionsanalyse der zeitliche Parameter der Stromverbrauchsentwicklung durch die exponentielle Regressionsgleichung über einen Koeffizientenvergleich einfach zu bestimmen.

$$y_{reg}(x) = k_{reg} \cdot e^{\eta_{reg} \cdot x} = 8 \cdot 10^{42} \cdot e^{-0,0472 \cdot x} \quad (10)$$

$\eta_{reg}$	Konstante der Regressionsgleichung
$y_{reg}$	Unabhängige Variabel der Regressionsgleichung
$k_{reg}$	Konstante der Regressionsgleichung

Durch direkten Vergleich der Parameter der Regressionsgleichung (10) und der zugrunde gelegten Stromverbrauchsentwicklung (8) folgt

$$\Rightarrow \eta_{average-eff} = \eta_{reg} = -0,0472 \quad (11)$$

$\eta_{reg}$	Konstante der Regressionsgleichung
$\eta_{average-eff}$	Zeitkonstante der Entwicklung

Der durch die Bildung der Regression zusätzliche multiplikative Parameter  $k_{reg}$  verliert bei dieser speziellen Analyse an Bedeutung. Dies liegt an dem speziellen Fokus auf die zeitliche Entwicklung, welche durch  $\eta_{reg}$  vollständig beschrieben wird. Der Betrag von  $\eta_{reg}$  stellt ein Maß der Schnelligkeit der Entwicklung des Stromverbrauches dar.

- Quantitative Bestimmung der additiven Konstanten des Stromverbrauches

Dabei ist die Arbeitszahl der Geräte – der Kältemaschine – definiert als

$$\varepsilon = \frac{Q_{zu}}{W} + 1 \quad (12)$$

$\varepsilon$	Arbeitszahl der Kältemaschine
$Q_{zu}$	zugeführte Wärme der Kältemaschine
$W$	Abwärmeleistung

Handelsübliche Geräte weisen eine Arbeitszahl  $\varepsilon$  im Bereich von 3,0 auf. Die Konstante  $k_{DT}$

ist gleich jene Menge an Energie, welche zur Befriedigung der Energiedienstleistung mindestens aufgebracht werden muss und wird nach den allgemein gültigen Gesetzen der Thermodynamik ermittelt. Der additive Term  $k_{DT}$  stellt somit die technische Grenze und die minimale Energiemenge zur Bereitstellung der zugrunde liegenden Energiedienstleistung dar.

Die in diesem Kontext relevante Energiedienstleistung wird wie folgt definiert:

- Kühlen von 5 kg/Tag Wasser von 30°C auf 5°C
- Zehnmaliges Kühlen von 160 l/Tag Luft von 30°C auf 5°C

Für die thermodynamische Berechnung werden das zu kühlende Kühlgut und die getauschte Luftmenge bei zehnmaligem Öffnen/Tag des Kühlschranks berücksichtigt.

$$E_{H_2O} = \frac{m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (T_2 - T_1)}{3600} = \frac{5 \frac{\text{kg}}{\text{Tag}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (30 - 5)^\circ\text{K}}{3600} = 0,145 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \quad (13)$$

$m_{H_2O}$             Gewicht der zu kühlenden Wassermenge  
 $c_{H_2O}$             spezifische Wärme von Wasser  
 $T_2, T_1$             Temperaturniveau

Bei der Berechnung der minimalen Energiemenge um die getauschte Luft zu kühlen, wird ein isochorer Prozess vorausgesetzt. Dabei wird angenommen, dass bei jedem Öffnen des Kühlschranks ein vollständiger Luftaustausch des Kühlschrankinnenraumes vonstatten geht.

$$E_{Luft} = \frac{V_{Luft} \cdot \rho_{Luft} \cdot X_{Tausch/Tag} \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) \cdot \xi}{3600 \cdot 1000} =$$

$$= \frac{160l \cdot 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \cdot 0,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (30 - 5)^\circ\text{K} \cdot 100\%}{3600 \cdot 1000} = 0,010 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \quad (14)$$

$V_{Luft}$             zu kühlendes Luftvolumen  
 $\rho_{Luft}$             spezifisches Gewicht von Luft  
 $X_{Tausch/Tag}$     Anzahl der Luftwechsel/Tag  
 $c_v$                 spezifische Wärme von Luft  
 $T_2, T_1$             Temperaturniveau  
 $\xi$                   prozentuelle Angabe, wie viel Luft bei einmaligem Öffnen getauscht wird

Die Summe der beiden ermittelten Terme bildet die minimale Energie zur Bereitstellung der unterstellten Energiedienstleistung.

$$k_{\text{Dyn}} = E_{\text{H}_2\text{O}} + E_{\text{Luft}} = 0,145 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} + 0,10 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} = 0,155 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{Q}{P_{\text{zu}}} - 1 \quad (16)$$

$\alpha$            Arbeitszahl der Kältepumpe  
 $Q$            Wärmemenge  
 $P$            zugeführte Leistung

Daraus resultiert direkt die gesuchte Größe durch Division mit der Arbeitszahl der Kältepumpe

$$\Rightarrow k_{TD} = 0,0518 \quad (17)$$

$k_{TD}$            additive Konstante der Stromverbrauchsentwicklung

#### Wirkungsgrad von derzeit am Markt verfügbaren Kühlschränken

Die thermodynamisch errechnete Energiemenge zur Bereitstellung der unterstellten Energiedienstleistung lässt einen interessanten Exkurs in die Berechnung des Wirkungsgrades aktueller handelsüblicher Geräte zu. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wirkungsgrad eine Funktion der Arbeitszahl der betrachteten Kältemaschine darstellt. Für die Berechnung wird daher eine Arbeitszahl von  $\varepsilon = 3$  unterstellt.

Wirkungsgrad eines handelsüblichen **effizientesten** Gerätes bei einer Arbeitszahl von  $\varepsilon = 3$

$$\eta_{\text{Best}} = \frac{Q}{W_{\text{Best}} \cdot \varepsilon} = \frac{0,156 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}}}{0,219 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \cdot 3} = 0,2374 = 23,74 \% \quad (18)$$

Q thermodynamisch berechnete Energiemenge  
 $W_{\text{BEST}}$  Stromverbrauch des effizientesten Gerätes  
 $\varepsilon$  Arbeitszahl der Kältemaschine

Wirkungsgrad eines handelsüblichen **durchschnittlichen** Gerätes bei einer Arbeitszahl von  $\varepsilon=3$

$$\eta_{\text{Average}} = \frac{Q}{W_{\text{Average}} \cdot \varepsilon} = \frac{0,156 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}}}{0,628 \frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \cdot 3} = 0,083 = 8,3 \% \quad (19)$$

Q thermodynamisch berechnete Energiemenge  
 $W_{\text{Average}}$  Stromverbrauch des durchschnittlich effizienten Gerätes  
 $\varepsilon$  Arbeitszahl der Kältemaschine

Setzt man die gleiche Entwicklung des Stromverbrauches eines hoch- und durchschnittlich-effizienten Gerätes voraus, stellt  $S_{\text{Gerät}}$  ein Maß für die mögliche Stromeinsparung dar. Diese Stromeinsparung wird in dieser Form praktisch jedoch nur dann realisiert, wenn bereits beim Kauf des Gerätes zu Gunsten des effizienteren Gerätes entschieden wird.

$$S_{\text{Gerät}}(t) \Big|_{\eta_{\text{best-eff}} = \eta_{\text{average-eff}}, k_{TD} = 0} = \frac{e_{\text{best-eff}}(t)}{e_{\text{average-eff}}(t)} \Big|_{\eta_{\text{best-eff}} = \eta_{\text{average-eff}}, k_{TD} = 0} = \quad (20)$$

$$= \frac{k_{\text{best-eff}} \cdot e^{(-\eta_{\text{best-eff}} \cdot (t-t_0))} + k_{TD}}{k_{\text{average-eff}} \cdot e^{(-\eta_{\text{average-eff}} \cdot (t-t_0))} + k_{TD}} \Big|_{\eta_{\text{best-eff}} = \eta_{\text{average-eff}}, k_{TD} = 0} = \frac{k_{\text{best-eff}}}{k_{\text{average-eff}}}$$

$S_{\text{Gerät}}$  rationale Angabe der möglichen Stromeinsparung pro Gerät  
 $e_{\text{best-eff}}$  Stromverbrauch der effizientesten (besten) Technologie  
 $e_{\text{average-eff}}$  Stromverbrauch der durchschnittlichsten Technologie  
 $t_0$  Startzeitpunkt der Simulation (2006)  
 $k_{\text{best-eff}}, k_{\text{average-eff}}$  multiplikative Konstanten  
 $\eta_{\text{best-eff}}, \eta_{\text{average-eff}}$  Zeitkonstanten der Entwicklung  
 $k_{TD}$  Thermodynamischer minimaler Stromverbrauch

- Quantitative Bestimmung der multiplikativen Konstanten des Stromverbrauches

Für die Bestimmung der multiplikativen Konstanten des Stromverbrauches der durchschnittlichen Geräte wird die Regressionsgleichung um den Zeitpunkt des Simulationsstarts verschoben. Drückt man den multiplikativen Parameter explizit aus und setzt das aktuelle Wertepaar – Jahr 2007 und der Durchschnittswert des Stromverbrauches – in die Gleichung ein, so ist der multiplikative Parameter bestimmt.

$$k_{average-eff} \Big|_{e_{average-eff}=0.54kWh/d, t=2007} = \frac{e^{(-\eta_{average-eff} \cdot (t-t_0))} + k_{TD}}{e_{average-eff}(t)} \Big|_{e_{average-eff}=0.54kWh/d, t=2007} = 1,096 kWh/d \quad (21)$$

$e_{average-eff}$	Stromverbrauch der durchschnittlichsten Technologie
$t_0$	Startzeitpunkt der Simulation (2006)
$k_{best-eff}, k_{average-eff}$	multiplikative Konstanten
$\eta_{best-eff}, \eta_{average-eff}$	Zeitkonstanten der Entwicklung
$k_{TD}$	Thermodynamischer minimaler Stromverbrauch

Für die Bestimmung der multiplikativen Konstanten des Stromverbrauches für effiziente Geräte kann ebenfalls wie bei der Berechnung der durchschnittlichen Geräte vorgegangen werden. Setzt man voraus, dass die Entwicklung der effizientesten und durchschnittlich effizienten Geräte gleich schnell vonstatten geht,

$$\eta_{average-eff} = \eta_{best-eff} \quad (22)$$

$\eta_{best-eff}, \eta_{average-eff}$  Zeitkonstanten der Entwicklung

erfüllen durch gleichen rechtsseitigen Grenzwert  $k_{TD}$  der beiden Verbrauchsentwicklungen die beiden multiplikativen Konstanten die Gleichung.

$$\frac{k_{average-eff}}{k_{best-eff}} = \frac{e_{average-eff}(t)}{e_{best-eff}(t)} \quad (23)$$

$k_{best-eff}, k_{average-eff}$  multiplikative Konstanten der Stromverbrauchsentwicklung  
 $e_{best-eff}, e_{average-eff}$  Funktion der Stromverbrauchsentwicklung

Diese Gleichung kann nun für jedes Jahr, für welche die Verbrauchswerte bekannt sind, ausgewertet werden. Es liegt natürlich nahe, diese Gleichung im Jahr 2007 auszuwerten, da die vorhandenen empirischen Daten die aktuellsten und sichersten darstellen.

$$\Rightarrow k_{best-eff} = 0,44 \text{ kWh/d} \quad (24)$$

$k_{best-eff}$  multiplikative Konstanten der Stromverbrauchsentwicklung

Vollständig quantitativ bestimmte Stromverbrauchsentwicklung

Die vollständig bestimmten Gleichungen des Stromverbrauches für durchschnittlich effiziente und effizienteste Geräte lauten

$$e_{best-eff}(t) = 0,44 \cdot e^{-0,0472 \cdot (t-1992)} + 0,0518 \quad (25)$$

$$e_{average-eff}(t) = 1,096 \cdot e^{-0,0472 \cdot (t-1992)} + 0,0518 \quad (26)$$

$e_{best-eff}$ ,  $e_{average-eff}$  Funktion der Stromverbrauchsentwicklung [kWh/d]

In **Abbildung 9** ist der Verlauf der beiden Stromverbrauchskurven als Funktion der Zeit dargestellt.

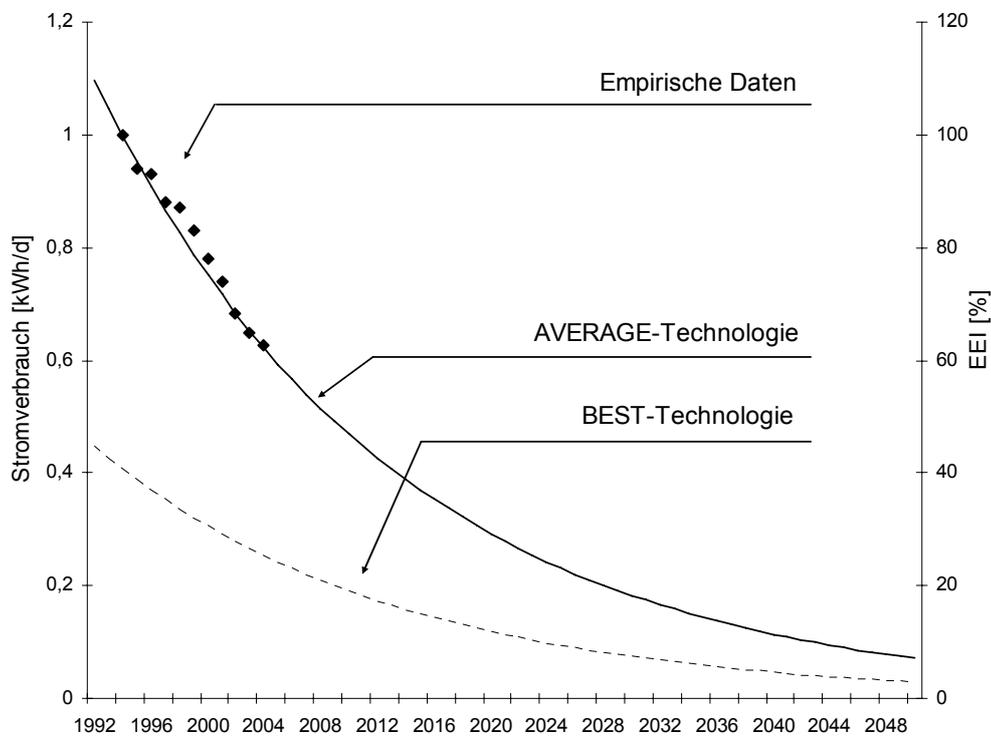


Abbildung 9: Extrapolation der Energieverbrauchsentwicklung einer Technologie (Kühlschrank) als Funktion der Zeit. Vergleich der BEST- and AVERAGE-Technologie – Effizienteste vs. Durchschnittliche. Graphische Darstellung der empirischen Quelldaten (Bertoldi et al., 2006) für die Extrapolation.

## 2.4.2 Altersstruktur des Gerätebestandes von Kühlschränken in Österreich

Die zeitliche Entwicklung des Gerätebestandes ist im Rahmen dieser Untersuchung von fundamentaler Bedeutung, da eine frühzeitige Tauschaktion einen direkten Eingriff in dieselbige darstellt. Demzufolge stellt der Gerätebestand zum Startzeitpunkt der Berechnung auch einen besonders signifikanten Einflussfaktor dar und wurde wie in Abbildung 10 dargestellt definiert.

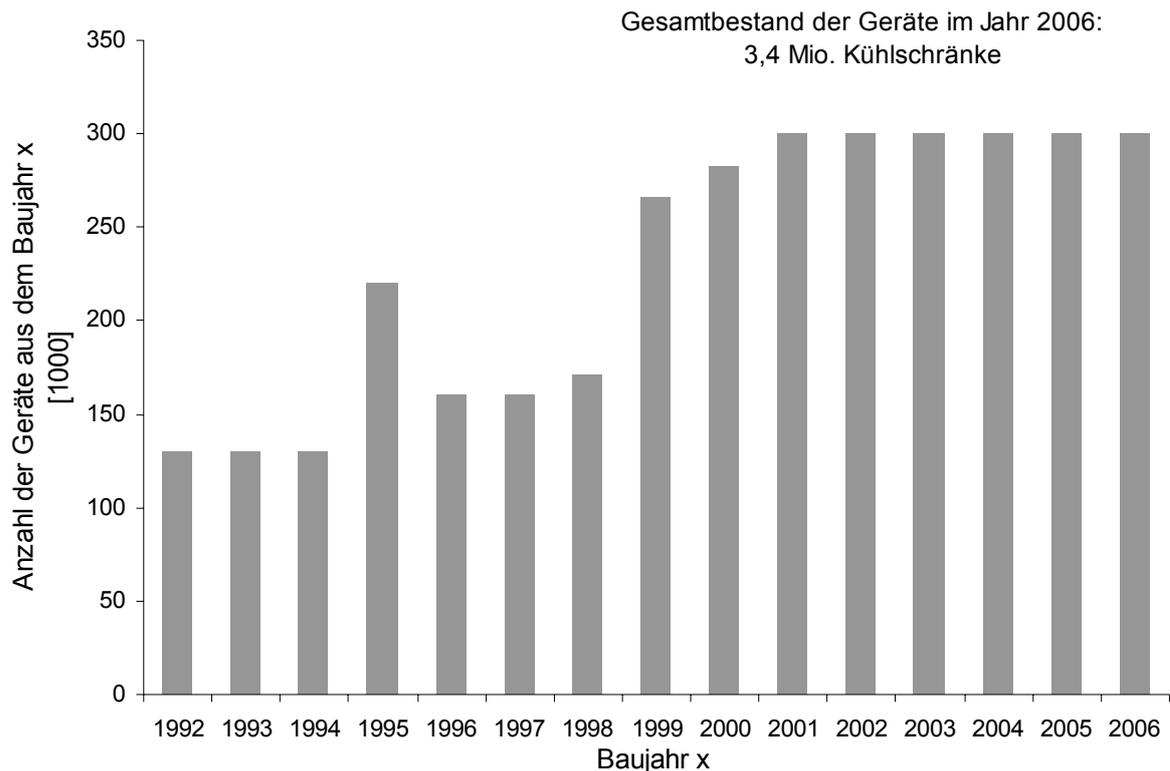


Abbildung 10: Angenommene Altersstruktur der Kühlschränke in Österreich im Jahr 2006. Der Gesamtbestand an Kühlschränken beträgt 3,4 Mio. Geräte

Der existierende Gerätebestand wird für Kühlschränke jüngerer Baujahre als konstant angenommen und weist in Richtung älterer Geräte einen deutlichen Abfall bis auf das Jahr 1995 auf. Die leicht erhöhte Anzahl an Geräten aus dem Jahr 1995 ist ein für Österreich typisches Phänomen. Da zu Beginn der 80er Jahre eine Mehrwertsteueranhebung seitens der Politik angekündigt wurde, kam es zu einer deutlichen Zunahme der Geräte durch Neuinstallationen. Diese Geräte müssen nach Ablauf der typischen Lebensdauer wieder getauscht werden (natürlicher Tausch) und erhöhen somit die Anzahl der Neuinstallationen im Jahr 1995.

### 2.4.3 Neugeräte

Die Anzahl der Neugeräte pro Jahr – nach 2007 – wird als konstant angenommen.

$$n_{neu}(t) = const = 15\ 000 \quad (27)$$

$n_{neu}$             Neu in den Markt eintretende Geräte

### 2.4.4 Austauschprogramm - Tauschstrategie

Um die Auswirkungen im ATP-Szenario eines Gerätetausches auf den kumulierten Stromverbrauch eines bestehenden Gerätebestandes zu untersuchen, müssen die Randbedingungen für die Tauschaktion und das Jahr des Gerätetausches angegeben werden. Hierfür ist eine auf das Baujahr bezogene Austauschstrategie als zweckmäßig zu erachten. Um „Freerider“ und die damit verbundenen Kosten zu minimieren, wird der Austausch eines einzelnen Gerätes näher untersucht und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Randbedingungen für das Austauschprogramm abgeleitet.

#### 2.4.4.1 Allgemeine Untersuchung von Austauschaktionen

Unterstellt man dem Stromverbrauch einer Technologie eine exponentielle Entwicklung über der Zeit, wie in Gleichung (8) und in Abbildung 9 dargestellt, ist kurzfristig eine deutliche Reduktion am Stromverbrauch durch natürlichen Tausch – Tausch, da Gerät am Ende der Lebensdauer – oder frühzeitiger Tausch der Geräte – erregt durch Austauschprogramm (ATP) – gegeben. Dies ist eine Folge des strengen Monotonieverhaltens der vorausgesetzten Verbrauchsentwicklung der Geräte.

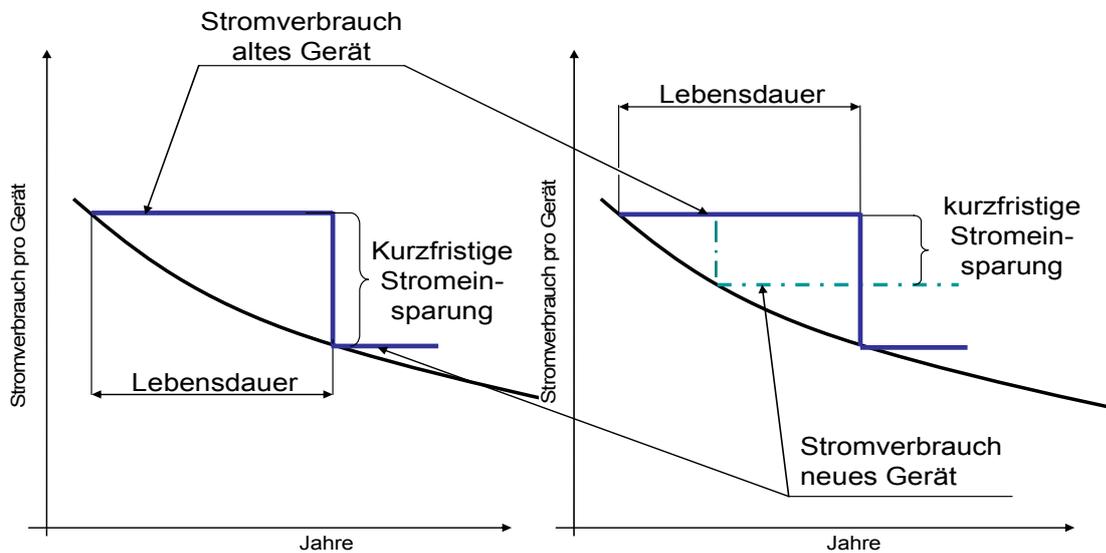


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Stromeinsparung von Geräten, welche sich am Ende der Lebensdauer befinden - natürlicher Austausch - (linke Seite des Bildes) und jenen, welche frühzeitig getauscht werden (rechte Seite des Bildes)

In Abbildung 11 sind sowohl die kurzfristigen Stromeinsparungen durch natürlichen Austausch der Geräte – linke Seite – als auch jene Einsparungen durch frühzeitigen Austausch – rechte Seite – dargestellt. Im Allgemeinen ist es bei natürlichem Austausch der Geräte nicht notwendig von kurzfristigen Einsparungen zu sprechen, da diese gleich den langfristigen Stromeinsparungen sind und es ohnehin nur durch den notwendigen Tausch des Gerätes – da Lebensdauer abgelaufen – zu Einsparungen kommt.

Wie in Abbildung 8 – rechte Seite – dargestellt, kommt es bei frühzeitigem Tausch der Geräte ebenfalls zu kurzfristigen Stromeinsparungen, welche sich von den tatsächlich langfristig bemerkbaren Einsparungen jedoch signifikant unterscheiden.

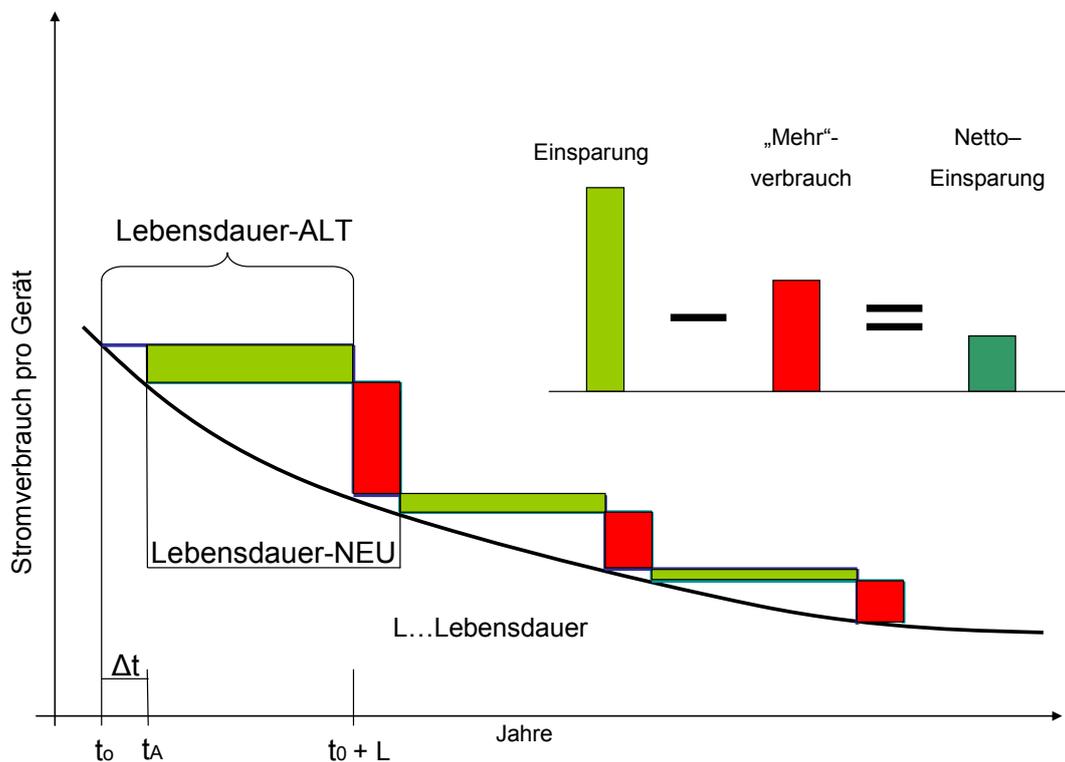


Abbildung 12: Graphische Darstellung der Nettostromeinsparung durch Gerätetausch. Skizziert sind die kurzfristige Stromeinsparung und der langfristige Mehrverbrauch an Strom bei einem frühzeitigen Austausch eines Gerätes

Die Abbildung 12 illustriert diesen Sachverhalt deutlich. Durch Berücksichtigung der Tatsache, dass während der Lebensdauer des neuen Gerätes das alte Gerät bereits getauscht werden muss und es somit zu „natürlichen“ Einsparungen an Strom kommt, reduziert sich die kurzfristige Stromeinsparung der frühzeitigen Tauschaktion um den Anteil der Einsparung, welche sich durch den natürlichen Tausch ergeben hätte.

Wird nun einer Gerätetauschaktion eine gewisse Stromeinsparung zugewiesen, so ist diese um den Anteil der erzielten natürlichen Einsparung zu reduzieren. Die resultierende Nettoeinsparung des frühzeitigen Gerätetausches – über zwei aufeinander folgende Generationen – werden im Folgenden berechnet.

- Savings  $E_s$

Durch den Tausch des Gerätes kommt es zur Mobilisierung eines vorhandenen Stromsparpotentials.

$$E_s(t) = [e(t_0) - e(t_A)] \cdot [L - (t_A - t_0)] \quad (28)$$

$E_s$	Stromeinsparungen
$e$	zugrunde gelegte Stromverbrauchsentwicklung
$t_A$	Austauschzeitpunkt
$t_0$	Zeitpunkt des Markteintrittes

- Waste  $E_w$

Da das getauschte Gerät aber ohnehin nach Ablauf der Lebensdauer getauscht werden muss, resultiert ein Strommehrverbrauch am Ende der Lebensdauer des neuen Gerätes.

$$E_w(t) = [e(t_A) - e(t_0 + L)] \cdot [t_A + L - (t_0 - L)] \quad (29)$$

$E_w$	Strommehrverbrauch
$e$	zugrunde gelegte Stromverbrauchsentwicklung
$t_A$	Austauschzeitpunkt
$t_0$	Zeitpunkt des Markteintrittes

- Nettostromeinsparung  $E_{NS}$

Die letztendlich resultierende Nettostromeinsparung errechnet sich zu

$$E_{NS}(t) = E_s(t) - E_w(t) \quad (30)$$

$E_{NS}$	Nettostromeinsparung
$E_s$	Stromeinsparung
$E_w$	Strommehrverbrauch

mit der Substitution

$$\Delta t = t_A - t_0 \quad (31)$$

$\Delta t$	Zeitspanne zwischen Austauschzeitpunkt und Zeitpunkt des Markteintrittes
$t_A$	Austauschzeitpunkt
$t_0$	Zeitpunkt des Markteintrittes

resultiert die Nettostromeinsparung des frühzeitigen Gerätetausches

$$E_{NS}(t) = L \cdot [e(t_0) - e(t_0 + \Delta t)] - \Delta t [e(t_0) - e(t_0 + L)] \quad (32)$$

$E_{NS}$	Nettostromeinsparung
$L$	Lebensdauer
$e$	Stromverbrauchsentwicklung

Für die nachstehende Diskussion der Eigenschaften und Charakteristiken von Geräteaus-tauschprogrammen genügt zur Beschreibung der Grundlagen die oben angeführte Ableitung.

Wie in Abbildung 12 illustriert, wiederholt sich im Wesentlichen die Reduktion der Stromeinsparungen bei jedem natürlichen fiktiven Gerätetausch des frühzeitig getauschten Gerätes wenn auch mit reduziertem Ausmaß<sup>3</sup>.

Um eine Austauschaktion so effektiv – möglichst großer Nutzen bei geringen volkswirtschaft-lichen Kosten – als möglich zu gestalten, bedarf es einer gesonderten Analyse und Beschreibung der Charakteristika von Gerätetauschaktionen.

#### Charakteristik der Stromnettoeinsparung

Legt man die drei bestimmenden Parameter der Verbrauchsentwicklung eines Gerätes wie in Gleichung (22) fest, ermöglicht diese eine graphische Darstellung der Stromnettoeinsparung als Funktion von  $\Delta t$  – wie in Abbildung 13 dargestellt.

---

<sup>3</sup> Aus dieser Überlegung kann die oben durchgeführte Berechnung der Nettostromeinsparung für zwei aufeinander folgende Generationen von Geräten auf mehrere bis hin zu unendlich vielen Generationen ausgeweitet werden. Dabei bedarf es lediglich einem fundamentalen Ansatz als mathematische Folge (Reihe) mit anschließender Grenzwertbildung.

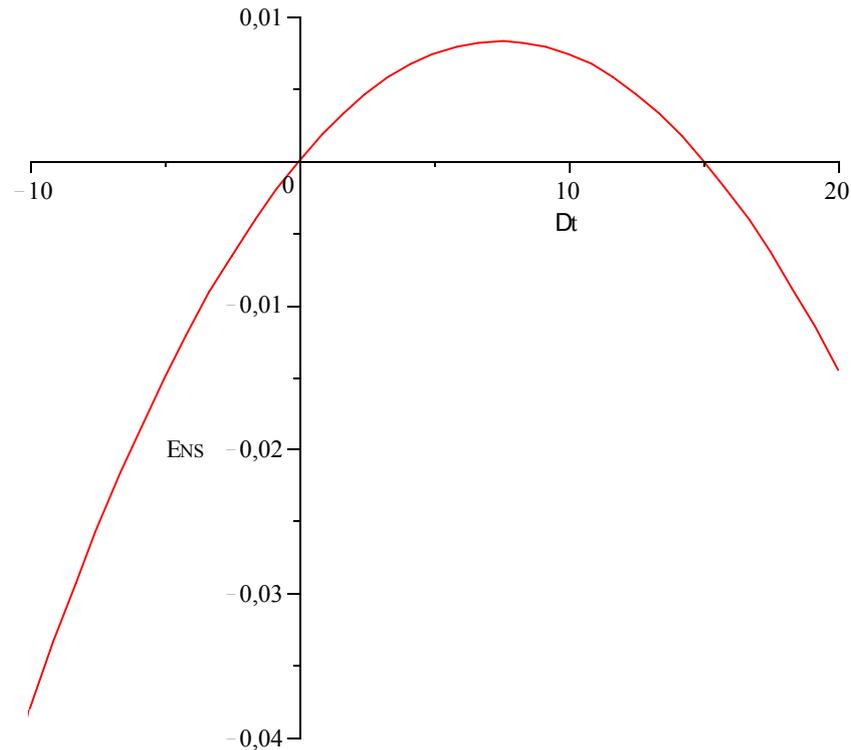


Abbildung 13: Graphische Darstellung der Stromnettoeinsparung eines frühzeitigen Gerätetausches als Funktion von  $\Delta t$  (=Differenz der Baujahre der beteiligten Geräte).

Die graphische Darstellung der Stromnettoeinsparung verdeutlicht die Abhängigkeit der tatsächlichen Einsparung von  $\Delta t$  (=Baujahres- und Zeitdifferenz des Eintrittes in den Gerätebestand).

Eigenschaften der Nettostromeinsparung – siehe Abbildung 13

- Die Funktion ist stetig im gesamten (und im praxisrelevanten – siehe unten) Definitionsbereich
- Die Funktion weist zwei Nullstellen auf bei ( $\Delta t = 0$  und  $\Delta t = L$ )
- Es existiert ein globales Maximum
- Die Funktion ist konkav

Die Funktionswerte für negative Argumente sind in diesem Sachverhalt der Untersuchung nicht praxisrelevant. Der für die Ausrichtung der Gerätetauschaktion relevante Bereich der Definitionsmenge beginnt bei

$$\Delta t = 0 \quad (33)$$

und endet bei

$$\Delta t = L \quad (34)$$

L                    Lebensdauer  
 $\Delta t$                 Zeitspanne zwischen Austauschzeitpunkt und Zeitpunkt des Markteintrittes

Diese beiden Grenzen des praxisrelevanten Definitionsbereiches resultieren direkt aus der Tatsache, dass Geräte keine negativen Lebensjahre annehmen können und werden durch eine analytische Betrachtung in Form einer Grenzwertbildung hinsichtlich der Nettostromeinsparung bestätigt.

- Linksseitiger Grenzwert

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} E_{NS}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} L \cdot [e(t_0) - e(t_0 + \Delta t)] - \Delta t [e(t_0) - e(t_0 + L)] = 0 \quad (35)$$

$E_{NS}$                 Nettostromeinsparung  
L                    Lebensdauer  
e                    Stromverbrauchsentwicklung  
 $\Delta t$                 Zeitspanne zwischen Austauschzeitpunkt und Zeitpunkt des Markteintrittes  
 $t_A$                 Austauschzeitpunkt  
 $t_0$                 Zeitpunkt des Markteintrittes

- Rechtsseitiger Grenzwert

$$\lim_{\Delta t \rightarrow L} E_{NS}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow L} L \cdot [e(t_0) - e(t_0 + \Delta t)] - \Delta t [e(t_0) - e(t_0 + L)] = 0 \quad (36)$$

$E_{NS}$                 Nettostromeinsparung  
L                    Lebensdauer  
e                    Stromverbrauchsentwicklung  
 $\Delta t$                 Zeitspanne zwischen Austauschzeitpunkt und Zeitpunkt des Markteintrittes  
 $t_A$                 Austauschzeitpunkt  
 $t_0$                 Zeitpunkt des Markteintrittes

## Praktische Interpretation der Grenzwerte

Frühzeitige Gerätetauschaktionen bringen keine Nettostromeinsparung bei Geräten

- mit selbigem Baujahr des zu tauschenden Gerätes
- welche sich am Ende der Lebensdauer befinden

Dies liegt daran, dass die oben gemachten Annahmen über die Stromverbrauchsentwicklung eine Abbildung implizieren, welche die Eigenschaft der Bijektivität aufweist – angesprochen ist die mathematische Abbildung zwischen Baujahr und dem Stromverbrauch eines Gerätes. Diese Bijektivität resultiert aus dem strengen Monotonieverhalten der Stromverbrauchsentwicklung.

Die frühzeitige Substitution jener Geräte, welche sich bereits am Ende der Lebensdauer befinden, weisen dahingehend keine Stromeinsparungen auf, da diese ohnehin kurz vor dem natürlichen Austausch stehen (Freerider).

Der Graph der Nettoeinsparung weist im praxisrelevanten Definitionsbereich ein ausgezeichnetes globales Maximum auf.

Hinsichtlich eines frühzeitigen Geräteaustauschprogramms (ATP) bedeutet dies, dass es ein ausgezeichnetes  $\Delta t$  gibt, bei welchem die Nettostromeinsparungen maximiert werden. Es macht somit Sinn hinsichtlich der Stromeinsparungen durch den Gerätetausch das Austauschprogramm nach den Baujahren der Geräte auszurichten.

Nettoeinsparungsmaximierung

$$\max_{\Delta t} E_{NS}(t) \quad (37)$$

$$\max_{\Delta t} E_{NS}(t) = \max_{\Delta t} \{L \cdot [e(t_0) - e(t_0 + \Delta t)] - \Delta t [e(t_0) - e(t_0 + L)]\} \quad (38)$$

$E_{NS}$	Nettostromeinsparung
$L$	Lebensdauer
$e$	Stromverbrauchsentwicklung
$\Delta t$	Zeitspanne zwischen Austauschzeitpunkt und Zeitpunkt des Markteintrittes
$t_A$	Austauschzeitpunkt
$t_0$	Zeitpunkt des Markteintrittes

Für die Bestimmung des globalen Maximums und des dazugehörigen Urbildes  $\Delta t^*$  ist die erste Ableitung der Nettostromeinsparung zu bilden. Die Nullstelle der entstehenden Funktion beinhaltet bereits den gesuchten Parameter.

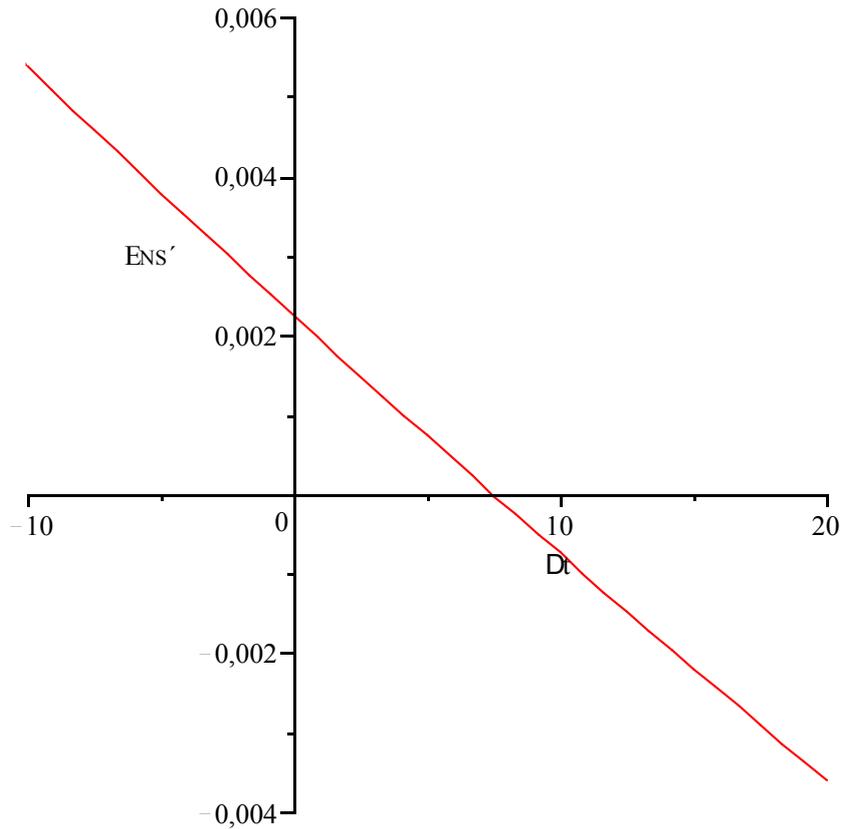


Abbildung 14: Graph der ersten Ableitung der Nettostromeinsparungsfunktion.

An der Stelle  $\Delta t^*$  liegt das globale Maximum der Stromnettoeinsparung.

$$\Delta t^* = - \frac{\tau(t_0 - T) - \ln\left(\frac{e^{\tau(t_0 - T)} - e^{\tau(t_0 + L - T)}}{L \cdot \tau}\right)}{\tau} \quad (39)$$

$\Delta t^*$	Idealer Austauschzeitpunkt
$\tau$	Zeitkonstante der Entwicklung des Stromverbrauches
$L$	Lebensdauer
$t_0$	Zeitpunkt des Markteintrittes
$T$	Konstante für die Stromverbrauchsentwicklung

Aus praktisch orientierter Sichtweise resultiert aus einem Geräteaustauschprogramm nur dann das Maximum an Stromeinsparung, wenn zwischen den substituierten und den neuen Geräten eine zeitliche Differenz des Eintrittes in den Bestand – und somit auch der beiden Baujahre der Geräte – von  $\Delta t^*$  existiert.

Aus der graphischen Darstellung – insbesondere deren Nullstelle – ist ersichtlich, dass bei oben gemachten Annahmen der Stromverbrauchsentwicklung, speziell für Kühlschränke, der Tauschzeitpunkt in der Nähe der halben Lebensdauer liegt.

$$\Delta t^* \approx \frac{L}{2} \quad (40)$$

$\Delta t^*$	Idealer Austauschzeitpunkt
$\tau$	Zeitkonstante der Entwicklung des Stromverbrauches
L	Lebensdauer

Erweitert man den Fokus der Betrachtung von frühzeitigen Geräteauschaktionen von Kühlschränken auf andere Geräte, so rückt die Abhängigkeit von  $\Delta t^*$  von der Lebensdauer in den Mittelpunkt des Interesses. Unterstellt man die angenommene Verbrauchsentwicklung des Kühlschranks auch einem anderen Gerät, so ist  $\Delta t^*$  als Funktion der Lebensdauer darstellbar – siehe Abbildung 15.

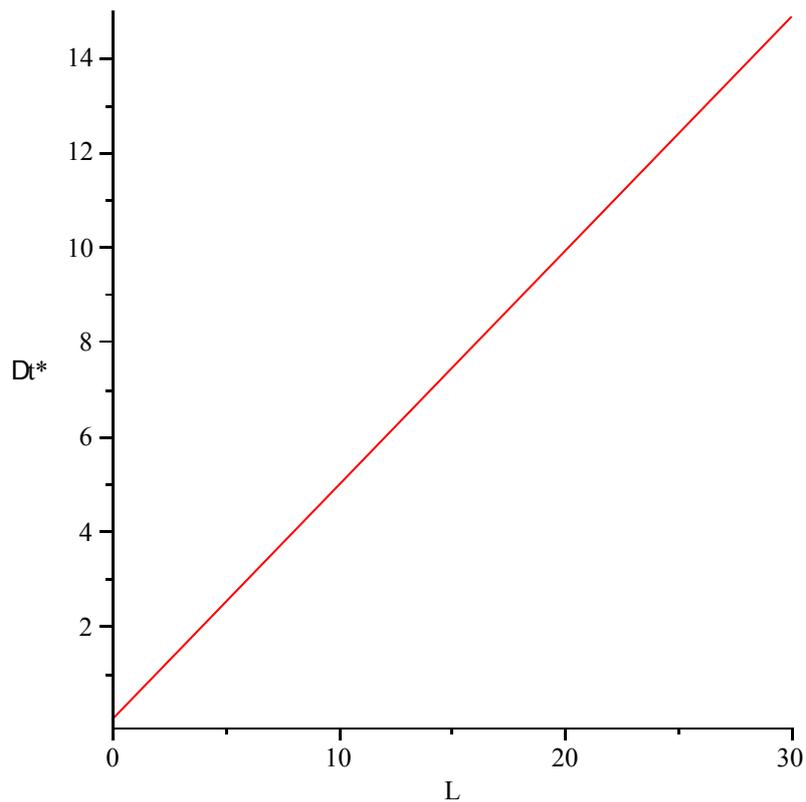


Abbildung 15: Graphische Abbildung der idealen Austauschzeitspanne  $\Delta t^*$  um die Nettoeinsparung einer Gerätetauschaktion zu maximieren. Die ideale Zeitspanne wird als Funktion der Lebensdauer dargestellt.

Wie in Abbildung 215 gut ersichtlich, weist die ideale Zeitspanne  $\Delta t^*$ , um die Nettoeinsparungen zu maximieren, eine deutliche Abhängigkeit von der zugrunde gelegten typischen Lebensdauer L des Gerätes auf.

Aus diesen Überlegungen heraus ist es somit von besonderer Bedeutung, diese neuen Erkenntnisse in die Festlegung der Bedingungen für die frühzeitige Geräteauschaktion mit einfließen zu lassen. Mit steigender Lebensdauer ist auch der ideale Zeitpunkt des frühzeitigen Austausches bezüglich der maximalen Stromeinsparung zeitlich verlagert.

#### 2.4.4.2 Restriktionen des implementierten Geräteauschprogramms

Da die obige Analyse der Nettoeinsparung bei der zugrunde gelegten Verbrauchsentwicklung gezeigt hat, dass der ideale Zeitpunkt des frühzeitigen Tausches von Geräten ca. in der Mitte der typischen Lebensdauer liegt, wird ein auf das Gerätealter ausgerichtetes Geräteauschprogramm definiert.

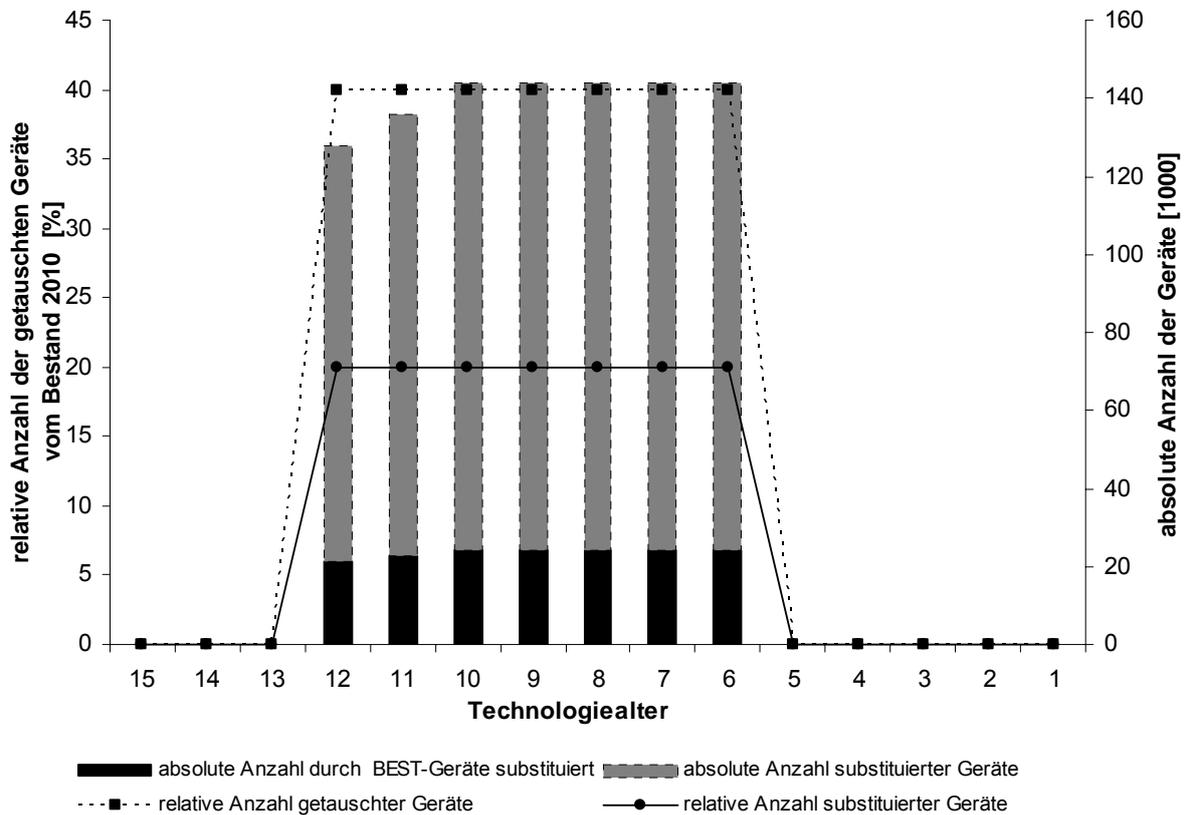


Abbildung 16: Graphische Darstellung der simulierten Gerätetauschaktion im Jahr 2010. Absolute und relative Geräteanzahl - bezogen auf den Bestand des jeweiligen Jahres – der getauschten Geräte. Absoluter und relativer Anteil der getauschten Geräte, welche durch BEST-Geräte substituiert wurden. Jüngere und ältere Geräte sind zur Tauschaktion nicht zugelassen.

Um die Frage nach der Sinnhaftigkeit von frühzeitigen Geräteauschprogrammen hinsichtlich der eingesparten Strommenge auch quantitativ erfassen zu können, ist es nötig, das Intervall der Baujahre der förderwürdigen Geräte etwas breiter zu gestalten. Durch diese Maßnahme kommen mehrere Geräte für den Austausch in Frage. Aus obiger Analyse der Stromnettoeinsparung würde

ein symmetrisches Intervall um die halbe typische Lebensdauer der Geräte als günstig erscheinen. Hinsichtlich des idealen wirtschaftlichen Austauschzeitpunktes, welcher sich deutlich später befindet (Kim et al., 2006), wird das Intervall in Richtung älterer Baujahre verschoben. Zur Vermeidung von „Freeridern“ werden Geräte, welche kurz vor Ende der Lebensdauer stehen, als nicht förderwürdig deklariert und vom Tauschprogramm ausgeschlossen. Da die fiskalischen Einsparungen durch eine Substitution eines Gerätes für jüngere Geräte im Bestand, im Vergleich zur Anschaffung (Kim et al, 2006), vernachlässigbar sind, werden auch jüngere Geräte aus der Tauschaktion ausgeschlossen – wie in Abbildung 16 für eine Tauschaktion im Jahr 2010 dargestellt.

## 2.4.5 Standard

Um die Auswirkungen auf den kumulierten Stromverbrauch eines bestehenden Gerätebestandes zu untersuchen, muss ein verpflichtender Standard und das Jahr der Einführung angegeben werden.

Das effizienteste Gerät des jeweiligen Jahres wird als Standard-Referenztechnologie definiert. Alle neu installierten Geräte entsprechen somit – ab dem Zeitpunkt der Einführung des Standards – dem effizientesten verfügbaren Gerät. Der Stromverbrauch der Standard-Referenztechnologie ist somit gleich dem der effizientesten Technologie.

$$e_{Standard}(t) = e_{best-eff}(t) \quad (41)$$

$e_{Standard}$   
 $e_{best-eff}$

zeitliche Entwicklungsfunktion des verpflichtenden Gerätestandards  
zeitliche Entwicklungsfunktion des effizientesten Gerätes am Markt

## 2.4.6 Parameterliste

Die bis dato nicht explizit erwähnten Inputparameter, welche jedem Szenario zugrunde gelegt werden, sind in Tabelle 1 aufgelistet.

	Wert 2006	zeitliche Änderung
wirtschaftliche Abschreibdauer	15 Jahre	-
Einkommenselastizität	1 %	-
Geräteneupreis	400 €	ist an Lernrate gebunden
Jahr des Austauschprogramms	2010	-
Jahr der Einführung von Standards	2010	-
Strompreis (Haushaltsstrompreis)	0,17 €/kWh	1 %/a
BIP-Wachstum	2 %/a	-
Lebensdauer	15 Jahre	-
Lernrate	0,02 %	-
Zinssatz	6 % /a	-

Tabelle 1: Parameterliste der Inputparameter – diese werden jedem erstellten Szenario zugrunde gelegt

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Referenz-Szenario

Um das vorhandene Einsparpotential zu verdeutlichen, muss ein Referenzwert für den kumulierten Stromverbrauch definiert werden. Tauscht man jährlich den gesamten Gerätebestand durch die aktuell am Markt verfügbaren effizientesten Geräte, resultiert die größtmögliche kumulierte Stromeinsparung.

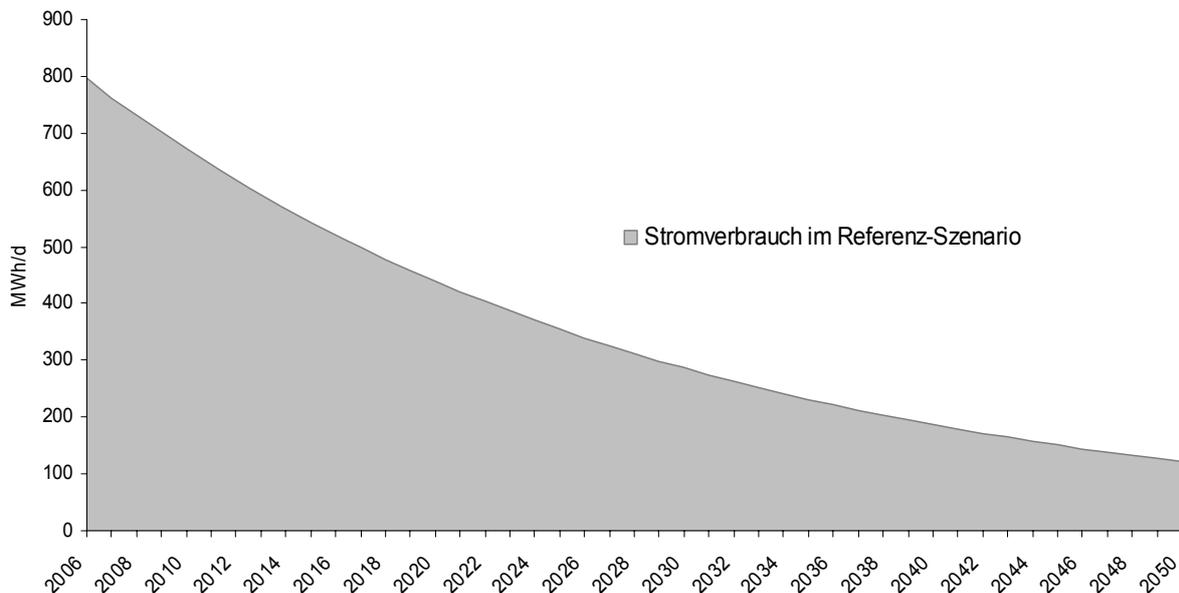


Abbildung 17: Kumulierter Stromverbrauch von Kühlschränken in Österreich im Referenz-Szenario. Dieses Szenario wird als minimaler Stromverbrauch und somit als technische Grenze definiert

Unter der Prämisse der bereits definierten Entwicklung des Stromverbrauches der Geräte, stellt das jährliche Tauschen der Geräte auf das Effizienteste somit die technische Grenze der erzielbaren Stromeinsparung dar. Dieses Szenario ist aus volkswirtschaftlichen Gründen fern der Realität und dient lediglich nur als Referenz.

Im Referenz-Szenario sinkt der kumulierte Stromverbrauch des Gerätebestandes kontinuierlich – siehe Abbildung 17.

Die Auswirkungen auf die natürliche Altersstrukturentwicklung sind in diesem Szenario natürlich besonders ausgeprägt, da es ja in jedem Jahr zu einem Tausch des vollständigen Gerätebestandes kommt.

## 3.2 HAB-Szenario

Im HAB-Szenario ist ein ausgeprägter kontinuierlicher Rückgang des kumulierten Stromverbrauches des Gerätebestandes zu erkennen – siehe Abbildung 18. Dabei nähert sich der Stromverbrauch nur sehr langsam an jenen des Referenz-Szenarios. Daraus resultiert nur eine geringe absolute Mobilisierung des möglichen Stromeinsparpotentials. Dem gegenüber steht jedoch ein bereits sehr geringer absoluter Wert des Stromverbrauches, im Vergleich zu beispielsweise des Stromverbrauches im BAU-Szenario – siehe Abbildung 19.

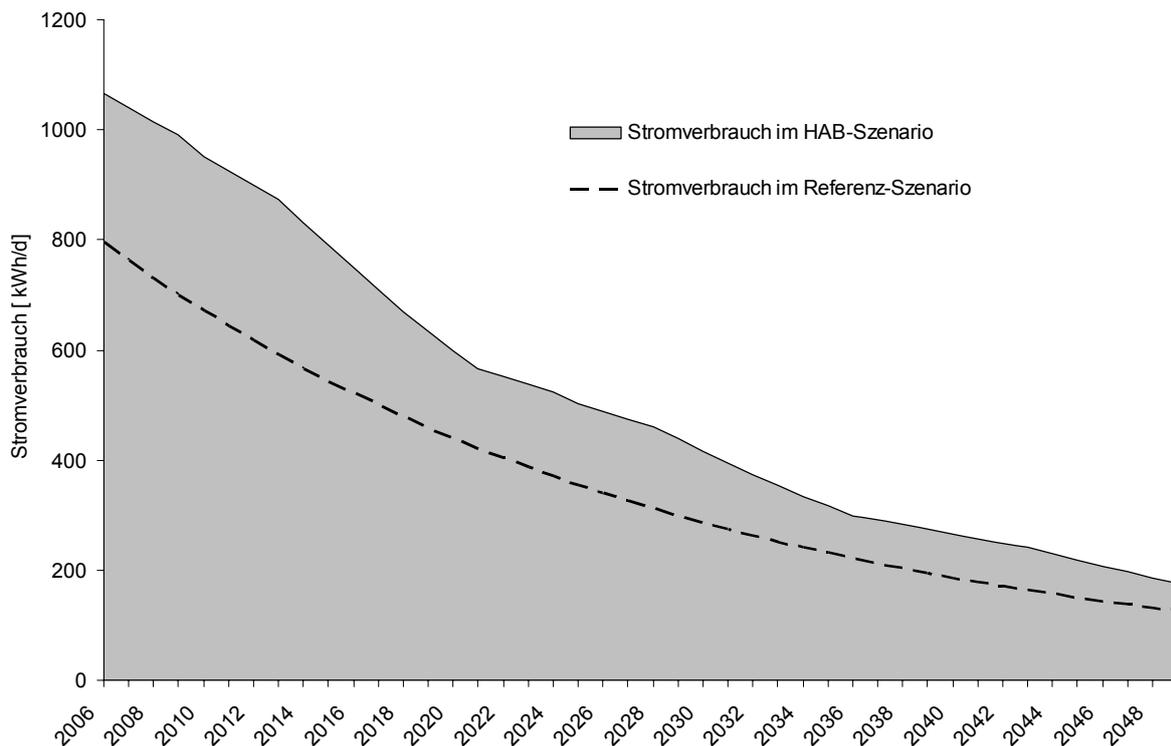


Abbildung 18: Kumulierter Stromverbrauch für Kühlschränke in Österreich im HAB-Szenario. Als Vergleich ist auch der kumulierte Stromverbrauch im Referenz-Szenario – technische Grenze – dargestellt

In diesem Szenario bleibt die natürliche Entwicklung der Altersstruktur des Gerätebestandes völlig unberührt. Grund dafür ist die Tatsache, dass es in diesem Szenario zu keinem Gerätetausch kommt, sondern an die in den Gerätebestand eintretenden Geräte das Kriterium der Effizienz gestellt wird und somit das Baujahr der Geräte für diese Betrachtung nur von sekundärer Bedeutung ist.

### 3.3 BAU-Szenario

Der errechnete kumulierte Stromverbrauch für Kühlschränke im BAU-Szenario ist in Abbildung 19 dargestellt. Durch die permanente Weiterentwicklung – technischer Fortschritt – abgebildet durch die streng monoton fallende Stromverbrauchsentwicklung der Geräte – ist ein kontinuierlicher Rückgang des Stromverbrauches zu beobachten.

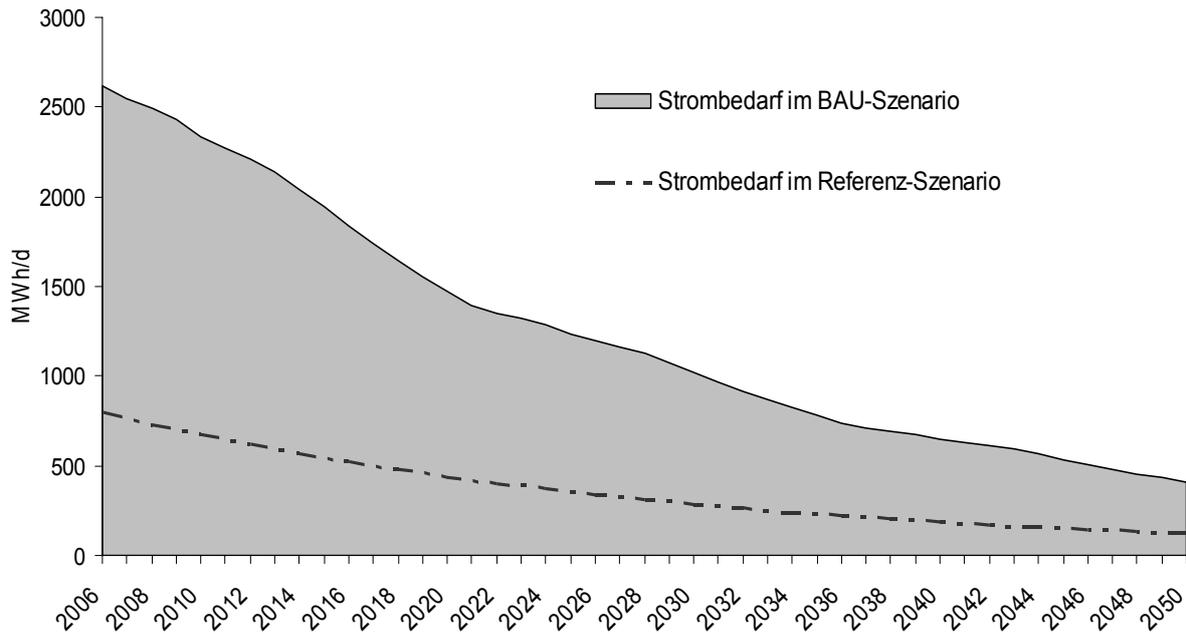


Abbildung 19: Kumulierter Stromverbrauch für Kühlschränke in Österreich im BAU-Szenario. Als technische Grenze – minimaler Stromverbrauch – wird der Stromverbrauch im Referenz-Szenario als Vergleichswert dargestellt

Deutlich zu erkennen ist das enorme Einsparpotential, welches zu Beginn der Simulation am größten ausfällt und sich mit fortlaufender Zeit reduziert. Im Vergleich zum Referenz-Szenario, in welchem die kumulierte Stromverbrauchsentwicklung eine „konstant glatte“ Kurve darstellt, ist der Kurvengradient der kumulierten Stromverbrauchsentwicklung im BAU-Szenario deutlich variabler – aber dennoch stets negativ. Dies liegt an der zugrunde gelegten Altersverteilung der Geräte und der Tatsache, dass die Geräteanzahl in den jeweiligen Jahren nicht konstant ist. Der Rückgang des Stromverbrauches wird durch die immer flacher werdende unterstellte Stromverbrauchsentwicklung begünstigt und wird durch den Stromverbrauch der neuen Geräte, welche in den Bestand jährlich eintreten, unterstützt.

Die neu installierten Geräte haben einen geringeren Mehrverbrauch an Strom zur Folge, dieser wird durch die stetige Effizienzentwicklung des Bestandes durch „natürlichen“ Austausch von Geräten – da sie sich am Ende der Lebensdauer befinden – kompensiert.

$$n_{\text{tausch}}(t_i) \cdot [e(t_i - L) - e(t_i)] > n_{\text{zusätzlich}}(t_i) \cdot e(t_i) \quad (42)$$

$$n_{\text{tausch}}(t_i) \gg n_{\text{zusätzlich}}(t_i) \quad (43)$$

$n_{\text{tausch}}(t_i)$       zum Zeitpunkt  $t_i$  ausgetauschte Geräte – da am Ende der Lebensdauer  
 $n_{\text{zusätzlich}}(t_i)$     zum Zeitpunkt  $t_i$  zusätzlich neue Geräte  
 $e(t_i)$                 durchschnittlicher Stromverbrauch/Gerät zum Zeitpunkt  $t_i$   
 $L$                       Lebensdauer

### 3.4 ATP-Szenario

Der kumulierte Stromverbrauch im ATP-Szenario sinkt mit fortlaufender Zeit und weist durch die Geräteauschaktion deutliche Sprünge auf. Durch den Einfluss des Geräteauschaktionsprogramms kommt es in äquidistanten Zeitabständen zu einem deutlichen Rückgang des kumulierten Stromverbrauches.

$$t_i^* = t_0 + n \cdot L \quad \text{mit } n \in \mathbb{N} \quad (44)$$

$t_i^*$             Zeitpunkt der deutlichen kumulierten Stromverbrauchsreduktion  
 $t_0$                 Zeitpunkt der Gerätetauschaktion

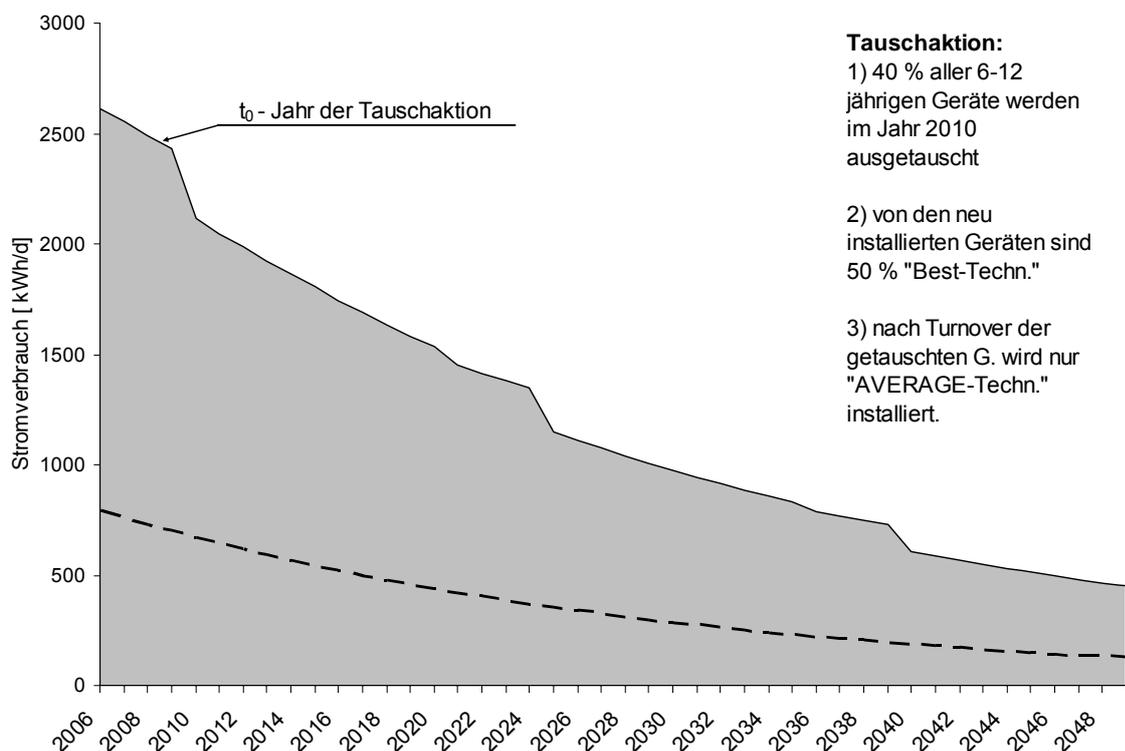


Abbildung 20: Kumulierter Stromverbrauch der Kühlschränke in Österreich im ATP- und Referenz-Szenario

Dabei sind die Zeitabstände, nach welchen es zu einem deutlichen Stromrückgang kommt, immer gleich der typischen Lebensdauer der Geräte (Kühlschränke:  $L = 15$ ). Ein Vergleich mit dem Referenz-Szenario zeigt, dass durch die Geräteauschaktion direkt zum Zeitpunkt des Gerätetausches – und nach periodischen Zeitabständen – deutliche Stromeinsparpotentiale realisiert werden. Wie groß diese Stromeinsparungen tatsächlich ausfallen, liegt unter anderem auch an der absoluten Anzahl der zur Tauschaktion zugelassenen Geräte.

Da die Lebensdauer der Geräte in diesem Modell für die ganze Berechnungsperiode als konstant vorausgesetzt wird, kommt es nach Ablauf der Lebensdauer der getauschten Geräte – zum Zeitpunkt  $(t_0 + \text{Lebensdauer})$  – zu einem Austausch der Geräte im Ausmaß der absoluten Zahlen des Austauschprogramms. Die abermaligen erzielten Einsparungen durch diesen Tausch der Geräte zum Zeitpunkt  $(t_0 + \text{Lebensdauer})$ , fallen kleiner aus als jene zum Implementierungszeitpunkt  $(t_0)$  des ATPs – siehe Abbildung 24. Dies liegt primär an dem zugrunde gelegten zeitlichen Verlauf des Stromverbrauches pro Gerät – siehe Abbildung 9. Durch die streng monoton fallende Entwicklung gilt

$$e_{\text{average-eff}}(t_0 + L \cdot n) > e_{\text{average-eff}}(t_0 + L \cdot (n+1)) \quad n \in \mathbb{N} \quad (45)$$

$e_{\text{average-eff}}$	Stromverbrauch eines durchschnittlichen Gerätes
$e_{\text{best-eff}}$	Stromverbrauch eines besten Gerätes
L	typische Lebensdauer

und sekundär daran, dass das Verhältnis (15) getauschter zu absoluter Geräteanzahl kleiner wird, da jährlich eine konstante Anzahl an Geräten installiert wird (9).

$$\frac{n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot n)}{n_{\text{Gesamt}}(t_0 + L \cdot n)} > \frac{n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot (n+1))}{n_{\text{Gesamt}}(t_0 + L \cdot (n+1))} \quad (46)$$

$$n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot (n+1)) = n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot n) + n_{\text{zusätzlich}}(t_0 + L \cdot n) \quad (47)$$

$n_{\text{tausch}}$	getauschte Geräte
$n_{\text{zusätzlich}}$	zusätzliche Geräte
L	Lebensdauer

### 3.5 Standard-Szenario

Durch das Einführen von verpflichtenden Gerätestandards kommt es zu einem kontinuierlichen Rückgang des kumulierten Stromverbrauches des Gerätebestandes. Dabei reduziert sich der Stromverbrauch direkt nach der Einführung der Standards besonders deutlich. Betrachtet man die weitere zeitliche Entwicklung, so stellt man fest, dass der Stromverbrauch eine ausgeprägte Affinität zu einem zeitlichen Verlauf – siehe Stromverbrauch im Szenario HAB – aufweist, welche niedrigere kumulierte Stromverbrauchswerte beschreibt – siehe Abbildung 19.

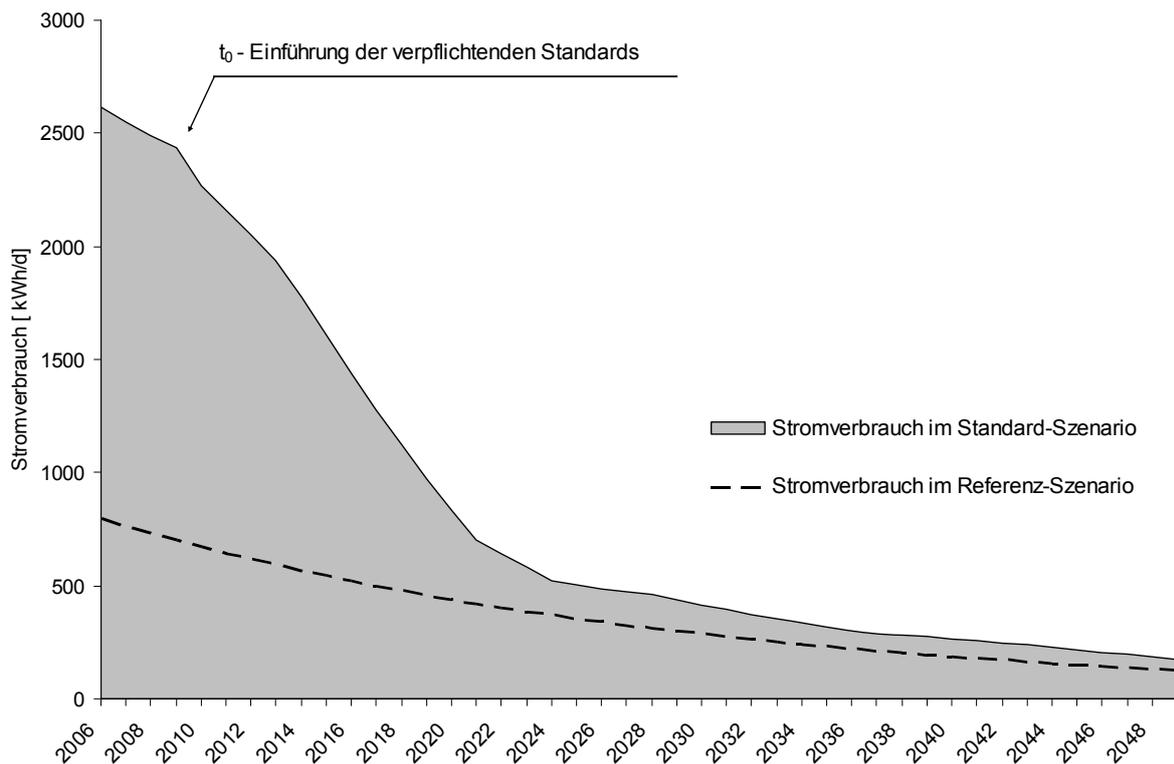


Abbildung 21: Kumulierter Stromverbrauch von Kühlschränken in Österreich im Standard-Szenario, welcher nach der Einführung der verpflichtenden Standards deutlich sinkt. Als Vergleich ist der kumulierte Stromverbrauch des Referenz-Szenarios dargestellt

Der Zeitraum von der Einführung der Standards zum Zeitpunkt  $t_0$  bis zum Übergang in den Bereich der nur mehr langsam sinkenden Stromverbrauchswerte, entspricht genau der typischen Lebensdauer.

Hinsichtlich des vorhandenen Stromeinsparpotentials – Vergleich mit Referenz-Szenario in Abbildung 21 – ist besonders nach der Einführung der verpflichtenden Standards eine enorme und kontinuierliche Mobilisierung zu erkennen.

Durch die Einführung von verpflichtenden Standards wird zu keinem Zeitpunkt in die natürlich sich entwickelnde Altersstruktur eingegriffen. Dies bedeutet, dass es zu langfristigen Stromeinsparungen kommt, ohne alte ineffiziente Geräte tauschen zu müssen und dies entspricht dem Wegfall der Ersatzinvestitionen der alten Geräte – wie sie bei einem Austauschprogramm anfallen würden.

### 3.6 Vergleich der Szenarien

Wie in Abbildung 22 zu erkennen steigt die Summe der Geräte – aufgrund der konstant angenommenen zusätzlichen Kühlschränke pro Jahr – nur noch langsam an<sup>4</sup> – es handelt sich speziell bei Kühlschränken um einen bereits gesättigten Markt (Biermayr, 1991).

Da durch ein Austauschprogramm lediglich die Altersstruktur des Bestandes verändert wird, das auf den kumulierten Gerätebestand keine Auswirkung hat, gilt obige Aussage auch für das ATP-Szenario.

In allen Szenarien werden die Bedeutung und der Einfluss auf den Bestand der Altersverteilung zu Beginn der Simulation ersichtlich. Das in Abbildung 10 dargestellte Altersprofil des Gerätebestandes spiegelt sich auch in der Anzahl der pro Jahr neu installierten Geräte in allen Szenarien wieder. Grund dafür ist die Konstanz der Lebensdauer und die strenge Annahme der Substitution, welche nach Ablauf der Lebensdauer einen zwingenden Gerätetausch vorsieht („natürlicher Austausch“).

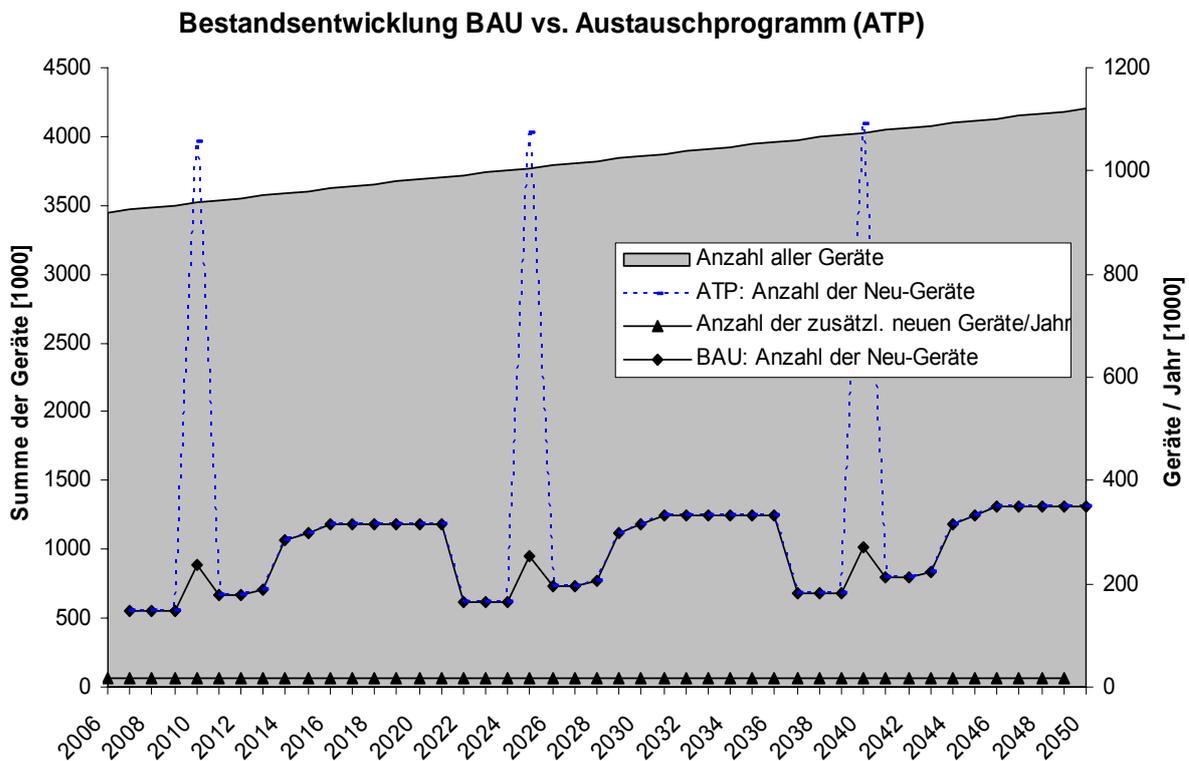


Abbildung 22: Bestandsentwicklung über der Zeit (primäre y-Achse). Vergleich von BAU und ATP-Szenario bezüglich der Neugeräte pro Jahr (sekundäre y-Achse) bei gleichem konstanten zusätzlichen Geräten/Jahr

Durch die Realisierung eines Geräteaustauschprogramms kommt es zu einem direkten Eingriff in die natürlich sich entwickelte Altersstruktur des Gerätebestandes. Dieser Eingriff ist lediglich eine Folge des frühzeitigen Austausches und nicht der speziell gewählten Randbedingung der Tauschaktion – Tausch nur, wenn Baujahre im bestimmten Intervall.

Einfluss des Austauschprogramms – siehe Abbildung 22.

<sup>4</sup> Aussage gültig für alle Szenarien

- Der Einfluss des Austauschprogramms erhöht die Anzahl der neu installierten Geräte pro Jahr im Jahr der Tauschaktion ( $t_0$ ).
- Ein frühzeitiges Austauschen (Substituierung vor Ende der Lebensdauer) von Geräten – zum Zeitpunkt  $t_0 = 2010$  – stellt einen direkten Eingriff in die natürliche Entwicklung der Altersstruktur des Gerätebestandes dar. Dadurch kommt es nach Ende der Lebensdauer zu den äquidistanten Zeitpunkten  $t_i^*$  zum deutlich erkennbaren Ansteigen der neu installierten Geräte.

$$t_i^* = t_0 + n \cdot \text{Lebensdauer} \quad \text{mit } n \in N \quad (48)$$

$t_i^*$	Zeitpunkt der deutlichen kumulierten Stromverbrauchsreduktion
$t_0$	Zeitpunkt der Gerätetauschaktion

### 3.7 Gegenüberstellung der Stromverbrauchsentwicklung resultierend aus den erstellten Szenarien

In Abbildung 23 sind die kumulierten Stromverbrauchsentwicklungen der unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Um einen direkten Vergleich der Sinnhaftigkeit von frühzeitigen Geräteaustauschprogrammen zu ziehen, wurde der Zeitpunkt der Realisierung des Austauschprogramms und der Einführung der verpflichtenden Gerätestandards in den jeweiligen Szenarien bewusst gleich gewählt ( $t_0 = 2010$ ).

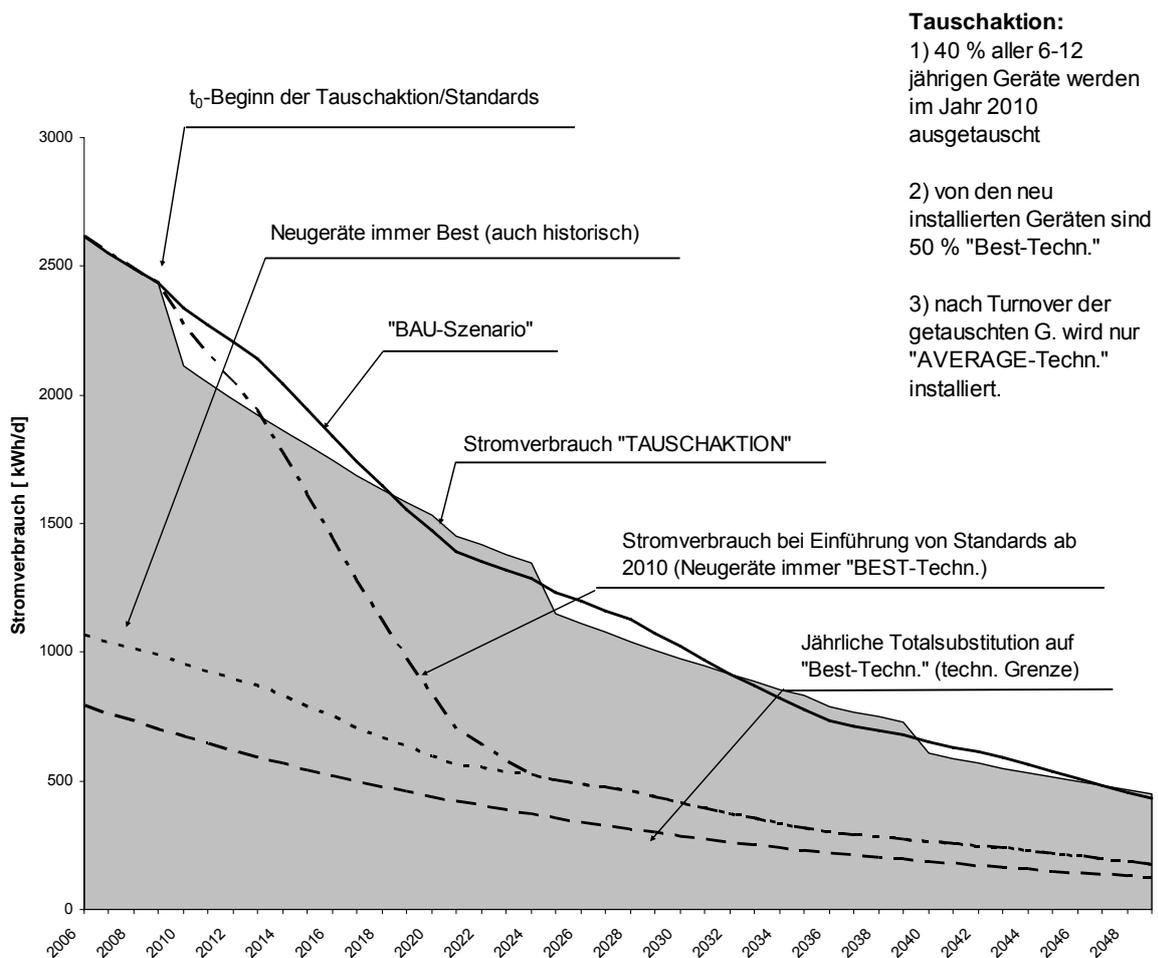


Abbildung 23: Gegenüberstellung der Stromverbrauchsentwicklung. Ein Vergleich der Stromverbrauchsentwicklung von Standard, BAU- und ATP-Szenario über der Zeit. Als Referenzwerte sind die Technische Grenze (jährliche Totalsubstitution) und der Stromverbrauch, hätte man immer nur die Besten (auch historisch) als Neugeräte zugelassen, dargestellt

## 3.8 Einsparungen durch Geräteaustauschprogramme und verpflichtende Standards

### 3.8.1 Stromeinsparung durch ATP

Betrachtet man im Vergleich zum BAU- das ATP-Szenario so ist ein deutlicher Rückgang des Stromverbrauches direkt nach dem Austauschzeitpunkt  $t_0$  der Geräte erkennbar, da die neuen gegenüber den getauschten Geräten einen geringen Stromverbrauch aufweisen – siehe Abbildung 23. Nach Ablauf der ca. halben Lebensdauer der getauschten Geräte, kommt es zu einem Anstieg des Stromverbrauches im Vergleich zum BAU-Szenario.

Durch das ATP werden Investitionen der Konsumenten in neue Geräte für mehrere Jahre vorgezogen. Dies hat zur Folge, dass für die Zeit der Lebensdauer  $L$  der Geräte eben diese Investitionen ausbleiben und somit auch die natürliche Entwicklung des Bestandes in Richtung geringerem Stromverbrauch mittelfristig verzögert wird – da nicht mehr regelmäßig neue (verbrauchsärmere) Geräte in den Bestand eintreten.

An dieser Stelle wird unterschieden ob der Konsument nach Ablauf der Lebensdauer des getauschten Gerätes ein durchschnittlich- oder ein effizientes Gerät installiert. Diese Unterscheidung ist hinsichtlich der langfristigen Stromeinsparungen von besonderer Bedeutung – siehe Abbildung 24. An den folgenden quantitativen Aussagen ändert dies jedoch nichts. In Abbildung 24 wird dieser Sachverhalt verdeutlicht.

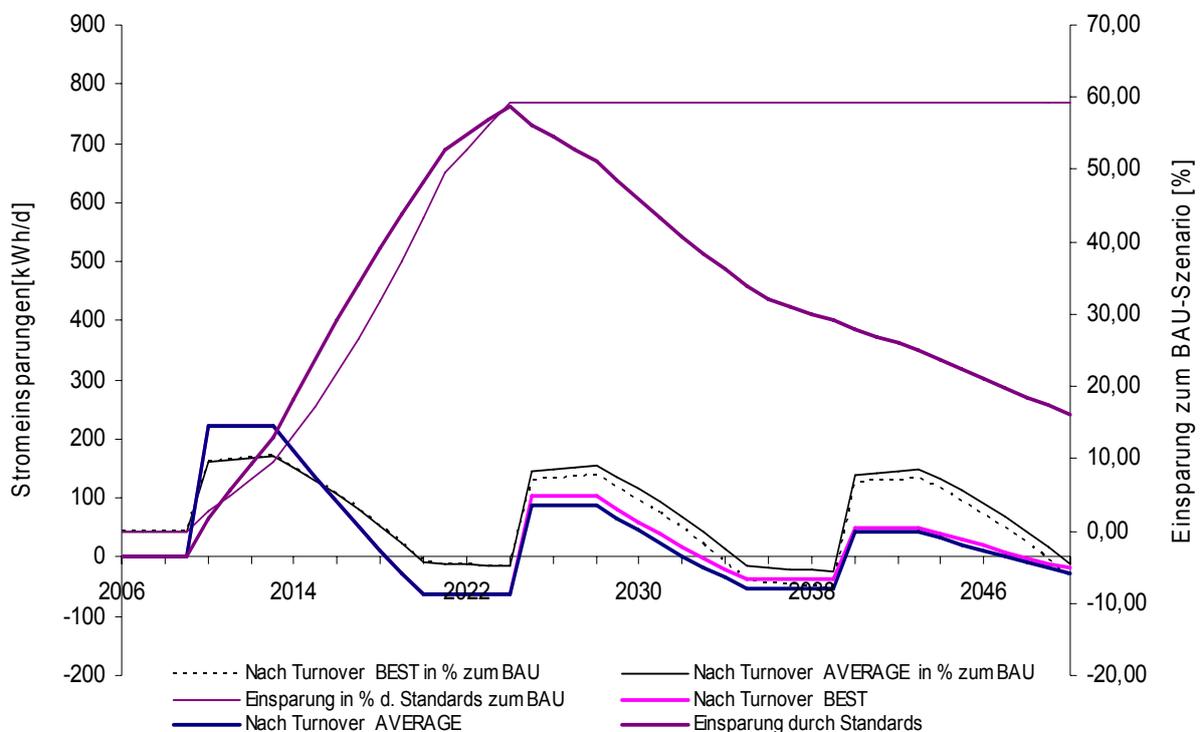


Abbildung 24: Stromeinsparungen durch das ATP und Standards im Vergleich zum BAU-Szenario unter der Berücksichtigung der Konsumentenentscheidung, ob nach der Lebensdauer ein durchschnittliches oder effizientes Gerät installiert wird.

Da die Lebensdauer der Geräte in diesem Modell für die ganze Berechnungsperiode als konstant vorausgesetzt wird, kommt es nach Ablauf der Lebensdauer der getauschten Geräte durch die Gerätetauschaktion – zum Zeitpunkt  $(t_0 + L)$  – zu einem Austausch der Geräte im Ausmaß der absoluten Zahlen des Austauschprogramms. Die abermaligen erzielten Einsparungen durch diesen Tausch der Geräte zum Zeitpunkt  $(t_0 + L)$  fallen kleiner aus als jene zum Implementierungszeitpunkt  $t_0$  des ATPs – Abbildung 24. Dies liegt primär an dem zugrunde gelegten zeitlichen Verlauf des Stromverbrauches pro Gerät – da die absolute Differenz des Stromverbrauches der durchschnittlich- und effizientesten Geräte mit steigender Zeit kleiner wird.

$$e_{average-eff}(t_0) - e_{best-eff}(t_0) > e_{average-eff}(t_0 + L \cdot (n+1)) - e_{best-eff}(t_0 + L \cdot (n+1)) \quad (49)$$

mit  $n \in \mathbb{N}$

$e_{best-eff}$	Stromverbrauch der effizientesten (besten) Technologie
$e_{average-eff}$	Stromverbrauch der durchschnittlichsten Technologie
$t_0$	Startzeitpunkt der Simulation
$L$	Lebensdauer

Primär liegt das an dem Ansatz der streng monoton fallenden Stromverbrauchsentwicklung

$$e_{average-eff}(t_0 + L \cdot n) > e_{average-eff}(t_0 + L \cdot (n+1)) \quad n \in \mathbb{N} \quad (50)$$

$e_{best-eff}$	Stromverbrauch der effizientesten (besten) Technologie
$e_{average-eff}$	Stromverbrauch der durchschnittlichsten Technologie
$t_0$	Startzeitpunkt der Simulation (2006)
$L$	Lebensdauer

und sekundär daran, dass das Verhältnis getauschter zu absoluter Geräteanzahl kleiner wird, da jährlich eine konstante Anzahl an Geräten installiert wird und von einer einmaligen Austauschaktion ausgegangen wird.

$$\frac{n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot n)}{n_{\text{Gesamt}}(t_0 + L \cdot n)} > \frac{n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot (n+1))}{n_{\text{Gesamt}}(t_0 + L \cdot (n+1))} \quad (51)$$

$n_{\text{tausch}}$                     getauschte Geräte  
 $n_{\text{Gesamt}}$                   gesamter Gerätebestand  
 $L$                                 Lebensdauer

$$n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot (n+1)) = n_{\text{tausch}}(t_0 + L \cdot n) + n_{\text{zusätzlich}}(t_0 + L \cdot n) \quad (52)$$

$n_{\text{tausch}}$                     getauschte Geräte  
 $n_{\text{Gesamt}}$                   gesamter Gerätebestand  
 $L$                                 Lebensdauer

In Abbildung 24 ist deutlich der Unterschied von Standards und ATP hinsichtlich der erzielten Einsparung zu erkennen – besonders in deren zeitlichem Verlauf. Die Einsparungen eines ATPs sind nur in den ersten Jahren direkt nach der Implementierung größer als bei der Einführung von Standards und somit stellt ein Austauschprogramm eine Möglichkeit dar, den Stromverbrauch eines Gerätebestandes kurzfristig und deutlich zu reduzieren.

Die Stromeinsparungen durch die Einführung von Standards weisen kurzfristig nur geringen Anstieg aber dafür Kontinuität auf und steigen in relativen Zahlen bis zum Erreichen eines Sättigungswertes. Die Zeit bis zum Erreichen des Sättigungswertes entspricht genau der Lebensdauer. Das ist jene Zeit die notwendig ist, bis alle Geräte nach dem Einführungszeitpunkt mindestens einmal getauscht und damit auf den – zum Tauschzeitpunkt – besten (effizientesten) Stand gebracht worden sind. Daraus folgt, dass der vollständige Gerätebestand zur Gänze aus effizienten Geräten besteht. Der relative Sättigungswert der Einsparung durch Standards ist gleich dem Quotienten der Verbrauchsentwicklungen nach Gleichung (7) und (8).

Der absolute Verlauf der Einsparungen durch verpflichtende Standards nimmt nach dem Verstreichen der typischen Lebensdauer der Geräte wieder ab. An der Stelle des absoluten Maximums der Stromeinsparungen ist der Stromverbrauch im Standardszenario gleich dem im HAB-Szenario.

Betrachtet man die Differenz des kumulierten Stromverbrauches im BAU-Szenario und HAB-Szenario, kann diese als eine Art „Altlast“ der Gesellschaft, entstanden durch historisch verabsäumte Einführung von verpflichtenden Gerätestandards, bezeichnet werden.

### 3.9 Kostenbetrachtung

### 3.9.1 Verpflichtende Standards

Durch das Einführen von verpflichtenden Gerätestandards kommt es durch den gezwungenen Einsatz besserer (teurerer) Technologie, welche einen gewissen Zuschlag auf die Investitionskosten darstellen, zu einer Anhebung der Investitionskosten von neuen Geräten. Diese Mehrkosten werden als Aufschlag auf die Investitionskosten vom Konsumenten getragen. Anfallende Transaktionskosten im Speziellen durch die Einführung der Standards, werden in Form von Steuern von der Bevölkerung (Steuerzahler) zu tragen sein.

$$C_{\text{Standard}} = C_T + \Delta I \quad (53)$$

$C_{\text{Standard}}$	Mehrkosten durch verpflichtende Gerätestandards
$C_T$	Transaktionskosten
$\Delta I$	Investitionsmehrkosten

### 3.9.2 Austauschprogramm

Die anfallenden Kosten der Realisierung eines Geräteauschprogramms steigen mit der Anzahl der am Austauschprogramm beteiligten Geräte. Neben den Investitionskosten fallen auch Transaktionskosten an.

Durch die Abhängigkeit der Kosten von der Anzahl der am Gerätetausch beteiligten Geräte, sind die Kosten des Austauschprogramms stark von den Randbedingungen (Restriktionen) der Tauschaktion abhängig. Demnach erscheint es sinnvoll, die Kosten eines Totalaustausches zu berechnen.

Um das Maximum an kurzfristigem Stromverbrauch eines Gerätebestandes einzusparen, bedarf es einer totalen Substitution des Gerätebestandes durch die effizientesten am Markt erhältlichen Geräte. Die Kosten der Totalsubstitution berechnen sich zu

$$C_{\text{Totalsub}}(t_{\text{sub}}) = x_{\text{ges}}(t_{\text{sub}}) \cdot P(t_{\text{sub}}) - \sum_{i=1}^L x(t_{\text{sub}} - i) \cdot [e_{\text{average-eff}}(t_{\text{sub}} - i) - e_{\text{best-eff}}(t_{\text{sub}})] \cdot \sum_{m=1}^L \frac{p_{\text{el}}(t_{\text{sub}} + m)}{(1+z)^m} \quad (54)$$

$C_{\text{Totalsub}}$	Kosten der Totalsubstitution von Kühlschränken
$x_{\text{ges}}$	Anzahl des Gesamtbestandes der Geräte
$P$	Preis der neuen (effizientesten) Geräte
$x$	Anzahl der neuinstallierten Geräte
$e_{\text{best-eff}}$	Stromverbrauch des effizientesten Gerätes
$e_{\text{average-eff}}$	Stromverbrauch des durchschnittlich effizienten Gerätes
$z$	Zinssatz der Diskontierung

$p_{el}$   
 $t_{sub}$

Haushaltsstrompreis  
Zeitpunkt der Totalsubstitution

Bei der Kostenermittlung werden neben den Investitionskosten auch die durch den Austausch der Geräte erzielten und monetär bewerteten Nettostromeinsparungen – welche sich reduzierend auf die Gesamtkosten auswirken – berücksichtigt.

Die über die Lebensdauer der neuen Geräte eingesparte Strommenge wird mit einem angenommenen Strompreis (Haushaltsstrompreis) multipliziert. Da die monetären Einsparungen zeitlich versetzt zur Investition fällig sind, müssen diese einer Diskontierung unterzogen werden. Da die Anzahl der Geräte, welche pro Jahr in den Gerätebestand eingetreten sind, nicht konstant ist, müssen die monetären Einsparungen mit der von Jahr zu Jahr unterschiedlichen Gerätezahl – Geräteanzahl selben Baujahres – multipliziert werden, bevor es zur Differenzbildung mit den Investitionskosten kommt.

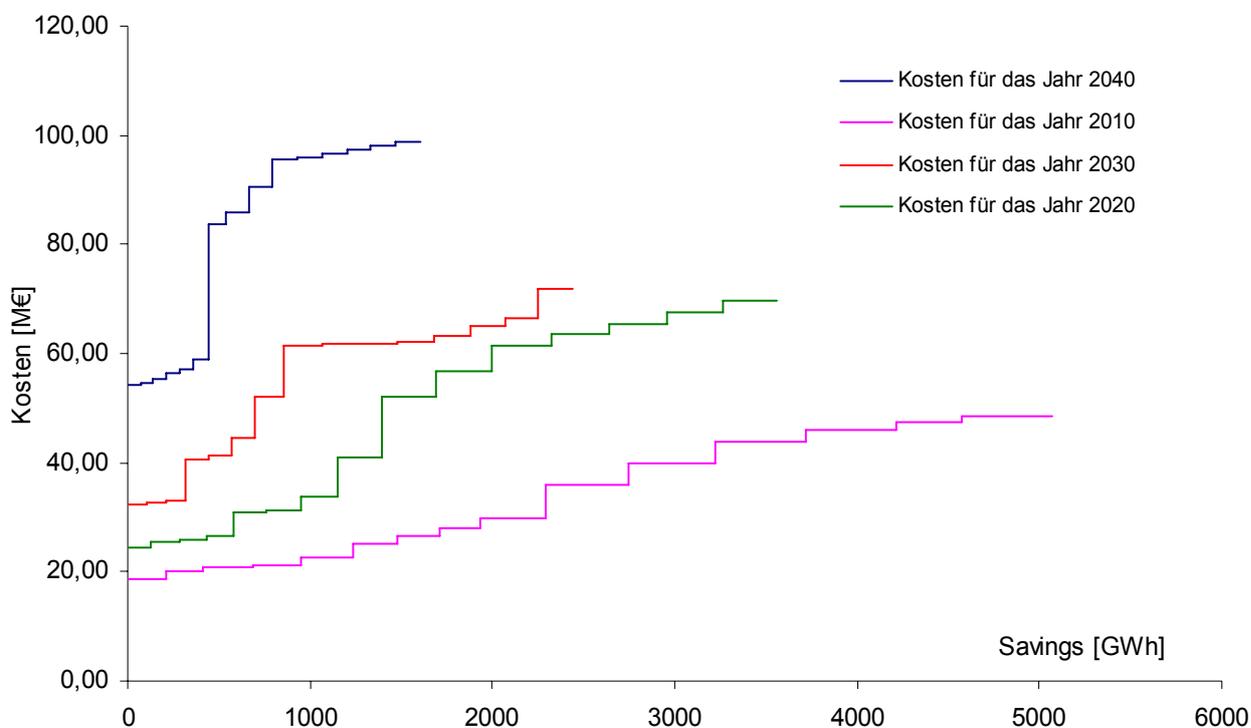


Abbildung 25: Graphische Darstellung der Kosten für die Totalsubstitution der Kühlschränke in Österreich bei unterschiedlichen Jahren des Gerätetausches.

In Abbildung 25 sind die errechneten Kosten der Totalsubstitution dargestellt. Dabei ist besonders die Abhängigkeit der Kosten von dem Zeitpunkt der Geräteauschrealisierung auffällig. Die in Abbildung 25 auf der Abszisse aufgetragenen Stromeinsparungen sind die Einsparungen innerhalb einer typischen Lebensdauer von Kühlschränken in Österreich. Die Treppenform der Kurve resultiert durch die Abhängigkeit der Kosten von dem jeweiligen Baujahr der Geräte – jede Stufe steht für den Tausch einer Geräteklasse mit selbigem Baujahr. Nach der Berechnung der Kosten des Tausches für eine Gruppe von baujahrgleichen Geräten wurde eine Sortierung der Kosten vorgenommen. Somit stellt eine Treppe der Kurve – vollständig beschrieben durch erzielte

Stromeinsparung und Kosten – bereits eine kumulierte Teilsumme der Gesamtkosten dar. Im Allgemeinen kann nicht darauf geschlossen werden, dass die billigsten Einsparungen durch den Tausch der ältesten im Gerätebestand befindlichen Geräte realisiert werden können, da man a priori nicht von derselben Anzahl der relevanten Geräte ausgehen darf – Anzahl der Geräte ist für unterschiedliche Baujahre über den gesamten Gerätebestand nicht konstant.

Bezieht man die Kosten der Stromeinsparung auf die eingesparte Strommenge, resultiert daraus der in Abbildung 24 dargestellte Verlauf. Da die eingesparte Strommenge über die ganze Lebensdauer der Geräte ermittelt wurde, stellt diese Kurve nicht die Grenzkostenkurve der Stromeinsparung dar.

Abbildung 26 verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Kosten vom Erfüllungszeitpunkt des Gerätetausches. Die Kosten steigen mit fortlaufender Zeit überproportional an. Dies liegt an der zugrunde gelegten Stromverbrauchsentwicklung und deren strengen Monotonieverhaltens, welches dazu führt, dass durch die Näherung der beiden Stromverbrauchsfunktionen (7) und (8) an den Grenzwert, die möglichen absoluten Stromeinsparungen mit steigender Zeit stetig kleiner werden.

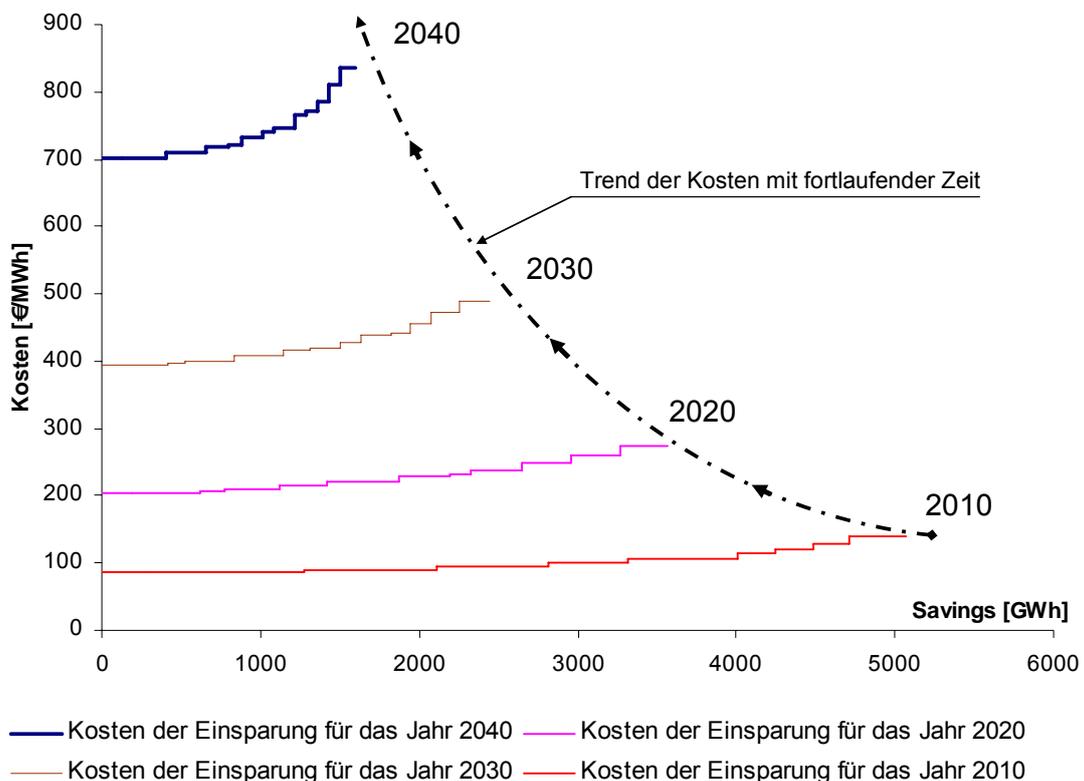


Abbildung 26: Graphische Darstellung der Kosten der Stromeinsparung, bezogen auf die über die Lebensdauer erzielten Stromeinsparungen in Abhängigkeit der eingesparten Strommenge.

## 4 Schlussfolgerung

Der frühzeitige Austausch von Geräten führt – unter der Annahme einer streng monotonen Stromverbrauchsentwicklung – direkt zu einer kurzfristigen Senkung des kumulierten Stromverbrauches eines Gerätebestandes (Kühlschränke in Österreich). Diese Stromeinsparungen sind durch den aktiven Eingriff in die Altersstrukturentwicklung des Gerätebestandes nur von kurzfristiger Dauer. Wird durch ein Austauschprogramm die Investitionsentscheidung der Konsumenten – durch Reduktion der Investitionskosten beispielsweise durch finanzielle Zuschüsse – beeinflusst, kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung der privaten Investitionen. Die ohnehin jedoch später fälligen Investitionen werden vorgezogen. Somit kommt es in den Folgejahren zu einer deutlichen Reduktion der absoluten Anzahl an privaten Investitionen und einem deutlichen Rückgang an natürlich getauschten Neuinstallationen von effizienteren Geräten. Die kurzfristigen mobilisierten Stromeinsparungen – durch die Austauschaktion – werden bei ca. der halben typischen Lebensdauer der Geräte vollständig kompensiert und es kommt zu einem Anstieg des kumulierten Stromverbrauches des Gerätebestandes.

Die Analyse von Geräteauschaktionen hinsichtlich der tatsächlichen langfristigen Stromeinsparung hat gezeigt, dass diese eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Austauschzeitpunkt aufweist. Der ideale Zeitpunkt des Austauschs eines Gerätes – um die Nettostromeinsparung zu maximieren – liegt ca. bei der halben typischen Lebensdauer eines Gerätes. Demnach macht es auch Sinn die Bedingungen für ein am Geräteauschprogramm teilnehmendes Gerät, an dessen bereits verstrichener Lebensdauer zu orientieren.

Kommt es zur Einführung verpflichtender dynamischer Gerätestandards, werden je nach Schärfe der Standards, kontinuierliche Stromeinsparpotentiale mobilisiert. Nach der Einführung ist nach Ablauf der typischen Lebensdauer der Geräte ein nur mehr langsamer Rückgang des kumulierten Stromverbrauches zu erkennen, da nach der Lebensdauer der gesamte Gerätebestand nur mehr aus effizientesten Geräten besteht. Der langsame Rückgang des Stromverbrauches nach der typischen Lebensdauer beruht auf der kontinuierlichen technischen Weiterentwicklung der Geräte.

Betrachtet man die Abhängigkeit der Kosten für eine Totalsubstitution des Gerätebestandes durch effiziente Geräte, ist eine deutliche Abhängigkeit vom Erfüllungszeitpunkt der Geräteauschaktion festzustellen. Je später es zu einer Realisierung kommt, desto höher sind die anfallenden Kosten des realisierten Gerätetausches. Die dabei zu mobilisierenden Stromeinsparpotentiale weisen ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Geräteauschtes auf. Dabei sinken diese bei späterer Gerätetotalsubstitution deutlich.

Bezieht man die Kosten des Gerätetausches auf die während einer typischen Lebensdauer mobilisierbaren Stromnettoeinsparungen, steigen die bezogenen Kosten in Abhängigkeit der Zeit deutlich an. Diese liegt zum Einen an der zugrunde gelegten monoton fallenden Stromverbrauchsentwicklung der Geräte und den damit verbundenem Sinken der Stromeinsparpotentiale und zum Anderen an den mit der Zeit ansteigenden absoluten Kosten der Totalsubstitution – da der kumulierte Gerätebestand über der Zeit einen Anstieg durch die neu in den Gerätebestand tretenden Geräte aufweist, müssen bei einer Totalsubstitution eine immer höhere Anzahl an Geräten ausgetauscht werden.

Hinsichtlich der Erreichung kurzfristiger Stromeinsparziele – wie sie beispielsweise die verpflichtende Reduktion von Klimagasen des Kyoto-Protokolles darstellen – sind Geräteauschprogramme eine durchaus diskussionswürdige Variante. Langfristige Reduktionen des kumulierten Stromverbrauches eines existierenden Gerätebestandes sind deutlich effizienter durch die Einführung verpflichtender Gerätestandards zu erreichen. Dem Nachteil der nur sehr gering ausfallenden kurzfristigen Stromeinsparungen von verpflichtenden Gerätestandards gegenüber

jenen bei Realisierung eines Geräteauschprogramms, stehen die nachhaltig realisierte Mobilisation von Stromeinsparungen – somit auch die Einsparung von Klimagasen – gegenüber.

## Referenzen

BIERMAYR Peter, 1999, „Einflussparameter auf den Energieverbrauch der Haushalte“

HAAS Reinhard et al., 1994, „The Salisbury Appliance Turn-In Program: Some Empirical Findings“

HACKL Peter, 1991, „Energetische und ökonomische Analyse des Energieverbrauchs von Elektrogeräten im Haushaltsbereich“

EIA, 2004 „Home energy use and costs: Residential Energy Consumption Survey“ Energy Information Administration, <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/contents.html>.

HYUNG CHUL, 2006, Kim et al., „Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost“, Energy Policy 34 (2310-2323)

BERTOLDI Paolo, 2006, ATANASIU Bogdan, „Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union“, European Commission

REITER Christian, 1991, Die betriebswirtschaftliche Rentabilität der S-A-F-E-Aktion für Energiesparer

## Anhang

### Programlisting

```
Public Sub Treppenkurve(row_kosten As Integer, _
    col_kosten As Integer, _
    row_saving As Integer, _
    col_saving As Integer, _
    row_kosten_target As Integer, _
    col_kosten_target As Integer, _
    row_saving_target As Integer, _
    col_saving_target As Integer, _
    row_saving_summe_target As Integer, _
    col_saving_summe_target As Integer, _
    row_kosten_graphik As Integer, _
    col_kosten_graphik As Integer, _
    row_saving_summe_graphik As Integer, _
    col_saving_summe_graphik As Integer)
```

'Diese Funktion dient dazu die Treppenkurve der Einsparungskosten abzubilden bzw. die Tabelle dafür zu erstellen

'Dabei müssen die Kosten und die Potentiale(savings) auch in dieser Reihenfolge zur Verfügung stehen

'Dim text As String

' 'Datenquelle angeben

'row\_kosten = 320

'col\_kosten = 15

'row\_saving = 320

'col\_saving = 16

'

' 'Zielzellen angeben

'row\_kosten\_target = 320

'row\_kosten\_target = 19

'row\_saving\_target = 320

'col\_saving\_target = 20

'

'row\_saving\_summe\_target = 320 'Angabe wo sollen die aufsummierten Savings hinkommen

'col\_saving\_summe\_target = 21 'Angabe wo sollen die aufsummierten Savings hinkommen

'

' 'Grphik --> Treppe

'row\_kosten\_graphik = 320

'col\_kosten\_graphik = 17

'row\_saving\_summe\_graphik = 320

'col\_saving\_summe\_graphik = 18

' Eruieren der Tabellenlänge durch Iteration

u = 0

Do While Not Cells(row\_kosten + u, col\_kosten).Value = vbEmpty

u = u + 1

tabellen\_laenge = u

Loop

```

' kopieren der Daten nach rechts auf die Targetposition
For i = 0 To tabellen_laenge
    Cells(row_kosten_target + i, col_kosten_target).Value = Cells(row_kosten + i, col_kosten).Value
    Cells(row_kosten_target + i, col_saving_target).Value = Cells(row_kosten + i, col_saving).Value
Next i

' Sortieren nach Kosten
Range(Cells(row_kosten_target, col_kosten_target), Cells(row_saving_target + tabellen_laenge -
1, col_saving_target)).Select

    Selection.Sort Key1:=Cells(row_kosten_target, col_kosten_target), Order1:=xlAscending,
Header:=xlGuess _
    , OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom, _
    DataOption1:=xlSortNormal

' Aufsummieren der Einsparung

For i = 0 To tabellen_laenge - 1
    If i = 0 Then
        Cells(i + row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value = Cells(i +
row_saving_target, col_saving_target).Value
    Else
        Cells(i + row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value = Cells(i +
row_saving_target, col_saving_target).Value + _
        Cells(i + row_saving_summe_target - 1, col_saving_summe_target).Value

    End If
Next i

' Graphische Aufbereitung
For i = 0 To tabellen_laenge
    Cells(row_kosten_graphik, col_kosten_graphik).Value = 0
    Cells(1 + row_kosten_graphik + i * 2, col_kosten_graphik).Value = Cells(i +
row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value
    Cells(1 + row_saving_summe_graphik + i * 2, col_saving_summe_graphik).Value = Cells(i +
row_kosten_target, col_kosten_target).Value

    Cells(1 + row_kosten_graphik + i * 2 + 1, col_kosten_graphik).Value = Cells(i +
row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value
    Cells(1 + row_saving_summe_graphik + i * 2 + 1, col_saving_summe_graphik).Value =
Cells(i + row_kosten_target, col_kosten_target).Value
Next i
End Sub

Sub Kostenkurve_pro_jahr()
'
'
' Makro am 28.11.2007 von Daniel Asch aufgezeichnet
'
'
    Range("E320:U338").Select
    Selection.ClearContents

Dim flag As Boolean

```

```
Application.Calculation = xlCalculationAutomatic
```

```
t0 = Cells(318, 4).Value  
lebensdauer = Cells(4, 6).Value  
zellenstart = 320  
target_col = 6
```

```
' Deduktion des Jahres auf der Zeitachse  
Do While Cells(13, 6 + i).Value < t0  
    i = i + 1  
    target_col = i + 6  
Loop
```

```
' Annuitätenfaktorberechnung
```

```
ab_dauer = Cells(314, 6).Value
```

```
If ab_dauer > lebensdauer Then  
    MsgBox ("Abschreibedauer ist größer den Lebensdauer weitere Berechnungen nicht gültig!")
```

```
End If
```

```
zinssatz = Cells(313, 6).Value  
ann_faktor = Cells(315, 6).Value  
flag = True
```

```
For i = 0 To lebensdauer - 1
```

```
    ' Kopieren der Daten aus Bestandstabelle
```

```
    If flag Then
```

```
        If Cells(13, target_col - i).Value > 2006 Then
```

```
            Cells(zellenstart + i, 5).Value = Cells(13, target_col - i).Value ' Jahre runter kopieren aus  
Bestandstabelle
```

```
            Cells(zellenstart + i, 12).Value = Cells(13, target_col - i).Value ' Jahre runter kopieren  
aus Bestandstabelle
```

```
            Cells(zellenstart + i, 6).Value = Cells(94, target_col - i).Value ' Neugeräte/Jahr kopieren  
aus Bestandstabelle
```

```
            merker = i ' dient als merker für die bereits vollzogenen Schleifengänge
```

```
        Else
```

```
            flag = False
```

```
            Cells(zellenstart + i, 5).Value = Cells(29 - i + merker, 4).Value ' Jahre runter kopieren  
aus Bestandstabelle
```

```
            Cells(zellenstart + i, 6).Value = Cells(29 - i, 3).Value
```

```
            Cells(zellenstart + i, 12).Value = Cells(29 - i + merker, 4).Value ' Jahre runter kopieren  
aus Bestandstabelle
```

```
        End If
```

```
    Else
```

```
        Cells(zellenstart + i, 5).Value = Cells(29 - i + merker, 4).Value ' Jahre runter kopieren  
aus Bestandstabelle
```

```
        Cells(zellenstart + i, 6).Value = Cells(29 - i, 3).Value
```

```
        Cells(zellenstart + i, 12).Value = Cells(29 - i + merker, 4).Value ' Jahre runter kopieren  
aus Bestandstabelle
```

```
    End If
```

```
' Strompreis(t) übertragen
```

```
    Cells(zellenstart + i, 10).Value = Cells(309, target_col + i).Value
```

```
' Berechnung der Einsparung als Differenz des Verbrauchs
```

```

Cells(zellenstart + i, 7).Value = Cells(122 + target_col - 6 - i, 4).Value - Cells(122 + target_col -
6, 3).Value

' Jahres Tabelle erzeugen
Cells(320 + i, 9).Value = Cells(318, 4).Value + i

' Berechnung der Annuität/Gerät --> am Ende der Lebensdauer wird keinen Annuität
verrechnet
If ab_dauer - i > 0 Then
    Cells(zellenstart + i, 14).Value = ann_faktor * Cells(312, target_col).Value
Else
    Cells(zellenstart + i, 14).Value = 0
End If

Next i

' Berechnung der Einsparung --> Verzinsung der finanziellen Einsparung
'For u = 0 To lebensdauer - 1
'summe_der_einsparung = 0
'
' For i = 0 To lebensdauer - 1 - u
'     summe_der_einsparung = Cells(zellenstart + i, 7).Value * Cells(zellenstart + i, 10).Value * (1
+ z) ^ (-i) * 365.25 + summe_der_einsparung
' Next i
'
' Cells(zellenstart + u, 13).Value = summe_der_einsparung
'
' ' Einsparung = (Annuität - Verbrauch * Strompreis) * Anzahl der Geräte / 1000 --> da in K€
' Cells(zellenstart + u, 15).Value = (Cells(zellenstart + u, 14).Value - Cells(zellenstart + u,
13).Value) * Cells(zellenstart + u, 6).Value / 1000
' ' Savings pro Jahr = Anzahl der Geräte im Jahr x * Einsparung * 365.25
' Cells(zellenstart + u, 16).Value = Cells(zellenstart + u, 7).Value * 365.25 * Cells(zellenstart +
u, 6).Value / 1000
' If u = ab_dauer - 1 Then ' Spezielle Fortschreibung bei dem Fall Abschreibungsdauer ist nicht
gleich Lebensdauer
'     For k = u To lebensdauer - 2
'         'Cells(zellenstart + k + 1, 13).Value = 0
'         Cells(zellenstart + k + 1, 16).Value = Cells(zellenstart + k + 1, 7).Value * 365.25 *
Cells(zellenstart + k + 1, 6).Value / 1000
'         summe_der_einsparung = 0
'         For i = 0 To lebensdauer - 1 - (k + 1)
'             summe_der_einsparung = Cells(zellenstart + i, 7).Value * Cells(zellenstart + i, 10).Value *
(1 + z) ^ (-i) * 365.25 + summe_der_einsparung
'         Next i
'         Cells(zellenstart + k + 1, 13).Value = summe_der_einsparung
'     Next k
' End If
'Next u

vg = lebensdauer - 1 ' variable Grenze zum verschieben der Referezgrösse der Einsparung

For u = 0 To lebensdauer - 1
' Fromat und Jahr anpassen
Cells(360, 1).Value = "Jahr"
Cells(360, 2).Value = "Summe ü. LD"
Cells(360, 3 + u).Value = Cells(122 + target_col - 6 + u, 2).Value
Cells(361 + u, 1).Value = Cells(122 + target_col - 6 - u, 2).Value

    summe2 = 0 ' zwischensumme der Einsparung ( energetisch)

```

```

summe3 = 0 ' zwischensumme der Einsparung ( finanziell)
For i = 0 To lebensdauer - 1 ' Laufvariable über die ganze Lebensdauer der neuen Technologie

    If i <= vg Then
        Cells(361 + u, 3 + i).Value = (Cells(122 + target_col - 6 - u, 4).Value - Cells(122 + target_col
- 6, 3).Value)
        'Stromeinsparung
        summe2 = Cells(361 + u, 3 + i).Value + summe2
        ' finanzielle Einsparung
        summe3 = summe3 + (Cells(122 + target_col - 6 - u, 4).Value - Cells(122 + target_col - 6,
3).Value) * (1 + zinssatz) ^ (-i) * Cells(320 + u, 10).Value * 365.25
    Else
        Cells(361 + u, 3 + i).Value = (Cells(122 + target_col - 6 - u + lebensdauer, 4).Value -
Cells(122 + target_col - 6, 3).Value)
        summe2 = Cells(361 + u, 3 + i).Value + summe2
        summe3 = summe3 + (Cells(122 + target_col - 6 - u + lebensdauer, 4).Value - Cells(122 +
target_col - 6, 3).Value) * (1 + zinssatz) ^ (-i) * Cells(320 + u, 10).Value * 365.25
    End If

Next i
vg = vg - 1

Cells(361 + u, 2).Value = summe2

'Tabelle ausfüllen und Kostenberechnen
' Einsparung/ Gerät = Einsparung/Jahr/Gerät * Strompreis(t) *
Diskontierungsfaktor(t)*365,25
Cells(320 + u, 13).Value = summe3
' Savings= Summer der Einsparung über Lebensdauer * Anzahl der Geräte / 1000
.../1000 da in GWh
Cells(320 + u, 16).Value = summe2 * Cells(320 + u, 6).Value * 365.25 / 1000

' Kostenermittlung
' Kosten = ((Annuitäten diskontiert - Einsparungen diskontiert) *anzahl der
Geräte)...Annuität ist aber gleich der Barwert zum Zeitpunkt des Tausches
' Kosten = (Barwert - diskontierte Einsparung über die Lebensdauer) *
Geräteanzahl/Baujahr

'Optional Kosten oder bezogene Kosten
Cells(320 + u, 15).Value = (Cells(312, target_col).Value - Cells(320 + u, 13).Value) * Cells(320 +
u, 6).Value / 1000 ' /1000 da in Mill.€
Cells(320 + u, 28).Value = (Cells(312, target_col).Value - Cells(320 + u, 13).Value) * Cells(320 +
u, 6).Value _
/ Cells(320 + u, 16).Value
Cells(320 + u, 29).Value = Cells(320 + u, 16).Value
Next u

Call Treppenkurve(320, 15, 320, 16, 320, 19, 320, 20, 320, 21, 320, 17, 320, 18)
Call Treppenkurve(320, 28, 320, 29, 320, 30, 320, 31, 320, 32, 320, 33, 320, 34)
End Sub

Sub treppenkurve_zusatz()
,
' treppenkurve_zusatz Makro
' Makro am 12.12.2007 von Daniel Asch aufgezeichnet
,
' Tastenkombination: Strg+l
,
lebensdauer = Cells(4, 6).Value

```

```

row_start = 320
col_start = 28

' Kosten / gesparte Energieeinheit errechnen und Einsparungen kopieren
For i = 0 To lebensdauer - 1
    Cells(row_start + i, col_start).Value = Cells(row_start + i, col_start - 13).Value /
Cells(row_start + i, col_start - 12).Value
    Cells(row_start + i, col_start + 1).Value = Cells(row_start + i, col_start - 12).Value
Next i

Dim text As String
'Datenquelle angeben
row_kosten = 320
col_kosten = 28
row_saving = 320
col_saving = 29

' Zielzellen angeben
row_kosten_target = 320
col_kosten_target = 30
row_saving_target = 320
col_saving_target = 31

row_saving_summe_target = 320 ' Angabe wo sollen die aufsummierten Savings hinkommen
col_saving_summe_target = 32 ' Angabe wo sollen die aufsummierten Savings hinkommen

' Graphik --> Treppe
row_kosten_graphik = 320
col_kosten_graphik = 33
row_saving_summe_graphik = 320
col_saving_summe_graphik = 34

' Eroieren der Tabellenlänge durch iteration
u = 0
Do While Not Cells(row_kosten + u, col_kosten).Value = vbEmpty
    u = u + 1
    tabellen_laenge = u

Loop

' kopieren der Daten nach rechts auf die Targetposition
For i = 0 To tabellen_laenge
    Cells(row_kosten_target + i, col_kosten_target).Value = Cells(row_kosten + i, col_kosten).Value
    Cells(row_kosten_target + i, col_saving_target).Value = Cells(row_kosten + i, col_saving).Value
Next i

' Sortieren nach Kosten
Range(Cells(row_kosten_target, col_kosten_target), Cells(row_saving_target + tabellen_laenge -
1, col_saving_target)).Select

Selection.Sort Key1:=Cells(row_kosten_target, col_kosten_target), Order1:=xlAscending,
Header:=xlGuess _
, OrderCustom:=1, MatchCase:=False, Orientation:=xlTopToBottom, _
DataOption1:=xlSortNormal

' Aufsummieren der Einsparung
For i = 0 To tabellen_laenge - 1
    If i = 0 Then

```

```

Cells(i + row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value = Cells(i +
row_saving_target, col_saving_target).Value
Else
Cells(i + row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value = Cells(i +
row_saving_target, col_saving_target).Value + _
Cells(i + row_saving_summe_target - 1, col_saving_summe_target).Value
End If
Next i

' Graphische Aufbereitung
For i = 0 To tabellen_laenge
Cells(row_kosten_graphik, col_kosten_graphik).Value = 0
Cells(1 + row_kosten_graphik + i * 2, col_kosten_graphik).Value = Cells(i +
row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value
Cells(1 + row_saving_summe_graphik + i * 2, col_saving_summe_graphik).Value = Cells(i +
row_kosten_target, col_kosten_target).Value

Cells(1 + row_kosten_graphik + i * 2 + 1, col_kosten_graphik).Value = Cells(i +
row_saving_summe_target, col_saving_summe_target).Value
Cells(1 + row_saving_summe_graphik + i * 2 + 1, col_saving_summe_graphik).Value =
Cells(i + row_kosten_target, col_kosten_target).Value

Next i

'ActiveSheet.ChartObjects("Diagramm 1485").Activate

' Titel des Diagramms anpassen

ActiveSheet.ChartObjects("Diagramm 1485").Activate
ActiveChart.ChartTitle.Select
ActiveChart.ChartArea.Select
text = Worksheets("modell").Cells(317, 12).Value

With ActiveChart
.HasTitle = True
.ChartTitle.Characters.text = text ""Kosten der Einsparung ""
End With
,
ActiveChart.SeriesCollection(1).Name = text
' ""="" Kosten der Einsparung im aktuellen Jahr""""
Windows("Paper_V7.xls").Activate

End Sub

Public Function invest(preis_el, v_a, v_b, I_a, I_b, annu_faktor, zuschuss) As Double
zuschuss = 60
preis_el = 88
v_a = 200
v_b = 83
I_a = 500
I_b = 700
annu_faktor = 0.11

If (p_el * v_a + I_a * annu_faktor) >= (p_el * v_b + I_b * annu_faktor - zuschuss) Then
invest = 1
Else
invest = 0
End If
End Function

```

```

Sub MainMakro1()
'
' Makro1
' Makro am 04.07.2007 von Daniel Asch aufgezeichnet
'
' Tastenkombination: Strg+ü
'
'Löschen Bestandmatrix

    Range("F14:BS92").Select
    Selection.ClearContents
    Range("F209:CF287").Select
    Selection.ClearContents

    lebensdauer = Cells(4, 6).Value
    austauschrate = Cells(5, 6).Value
    x_zusaetzlich = Cells(6, 6).Value
    ende_der_berechnungsperiode = 2070 - 2006

'Elastizitäten einlesen
einkommens_elastizitaet = Cells(306, 9).Value
preis_elastizitaet = Cells(305, 9).Value
einkommens_elastzitaet = Cells(306, 9).Value

'Initialisierung
counter1_end = 1

    For k = 1 To (lebensdauer + 14)
        If Cells(13 + k, 4).Value + lebensdauer > Cells(13, 6).Value Then
            If Cells(13 + k, 4).Value <= Cells(13, 6).Value Then
                For lauf = 0 To lebensdauer - 1
                    If Cells(13 + k, 4).Value + lebensdauer - Cells(13, 6 + lauf).Value > 0 Then
                        Cells(13 + k, 6 + lauf).Value = Cells(13 + k, 2)
                    End If
                Next lauf
            End If
        End If
    Next k

'Auffüllen
    For w = 1 To ende_der_berechnungsperiode

'Neubestand + quer-aufgefüllt bis lebensdauer abgelaufen
        If w + lebensdauer < 84 Then
'Neuengeräte in Summe --> x_neu = x_zusätzlich + x_natürlich_getauscht(aber aus Zeile
entnommen)
            Cells(28 + w, 6 + w).Value = Cells(96, 6 + w).Value + Cells(28 + w - lebensdauer, 6 + w -
1).Value
            Cells(94, 6 + w).Value = Cells(28 + w, 6 + w).Value
            For i = 1 To lebensdauer - 1

                Cells(28 + w, 6 + w + i).Value = Cells(28 + w, 6 + w).Value
            Next i
        End If

'Referenzdaten --> immer alles gegen die besten ersetzen --> Dieser Wert stellt so die technische
Grenze dar!

```

```

Cells(185, 5 + w).Value = Cells(93, 5 + w).Value * Cells(w + 121, 3).Value
Next w

' Verbrauch berechnen "oberes Dreieck"
For u = 1 To 65
  For i = 1 To 15
    If Cells(208 + i, 6).Value < Cells(208, 6).Value Then
      delta_preis = Cells(309, 6 + 1 + i).Value - Cells(309, 6 + i).Value
      preis = Cells(309, 6 + i).Value
      Cells(208 + i, 6 + u - 1).Value = Cells(13 + i, 6 + u - 1).Value * Cells(208 + i, 4).Value * (1 +
delta_preis / preis) ^ preis_elastizitaet * (1 + Cells(308, 6 + i).Value) ^ einkommens_elastizitaet
    End If
  Next i
Next u

' Verbrauch berechnen "Rest"
For w = 1 To ende_der_berechnungsperiode
  If Cells(208, 6 + w - 1).Value < Cells(200, 5).Value - 1 Then
    Cells(224 + w - 1, 6 + w).Value = Cells(29 + w - 1, 7 + w - 1).Value * Cells(224 + w - 1,
4).Value
  Else
    Cells(224 + w - 1, 6 + w).Value = Cells(29 + w - 1, 7 + w - 1).Value * Cells(224 + w - 1,
3).Value
  End If
  For i = 1 To lebensdauer - 1
    Cells(224 + w - 1, 6 + w + i).Value = Cells(224 + w - 1, 6 + w).Value
  Next i
Next w
End Sub

Public Function summe(start_summand_row, start_summand_col, anzahl_summanden) As
Double
  For i = 1 To anzahl_summanden
    summe = summe + Cells(start_summand_row + i - 1, start_summand_col).Value
  Next i
  ' summe =application.Worksheetfunction.Sum()
End Function

Sub Substitution()
'
' Makro1 Makro
' Makro am 23.10.2007 von Daniel Asch aufgezeichnet
'
Call MainMakro1 'startet Modell zur Herstellung des "BAU-Szenarios"

preis_elastizitaet = Cells(305, 9).Value
einkommens_elastizitaet = Cells(306, 9).Value

startjahr = Cells(20, 75).Value
lebensdauer = Cells(4, 6).Value

ende_der_berechnungsperiode = 2070 - 2006

Range("CL14:EX92").Select
Selection.ClearContents

Range("BY21:BY61").Select
Selection.ClearContents

```

```
Range("CA21:CA61").Select
Selection.ClearContents
```

```
'Bereitstellung der X-Achse der relativen Tauschangabe
```

```
For i = 0 To lebensdauer - 1
    Cells(21 + i, 77).Value = lebensdauer - i
Next i
```

```
ii = 2006
```

```
Do While ii < 2070          ' Startwert suche durch Iteration
    If startjahr = Cells(13, 6 + ii - 2006).Value Then
```

```
        ' Absolute Anzahl der getauschten Technologie in 1000 Stücken
        For i = 0 To lebensdauer - 1
            Cells(21 + i, 79).Value = Cells(21 + i, 78).Value / 100 * Cells(14 + i + ii - 1992 -
lebensdauer + 1, 6 + ii - 2006).Value ' absolute Angabe
            Cells(21 + i, 81).Value = Cells(21 + i, 80).Value / 100 * Cells(21 + i, 79).Value
        ' absolute Angabe
        ' in der Bestandstabelle korrigieren
            Cells(14 + i + ii - 1992 - lebensdauer + 1, 6 + ii - 2006).Value = Cells(14 + i + ii - 1992 -
lebensdauer + 1, 6 + ii - 2006).Value - Cells(21 + i, 79).Value
            For J = 1 To lebensdauer
                If Not Cells(14 + i + ii - 1992 - lebensdauer + 1, 6 + ii - 2006 + J).Value = vbEmpty
```

```
Then
```

```
                Cells(14 + i + ii - 1992 - lebensdauer + 1, 6 + ii - 2006 + J).Value = Cells(14 + i + ii -
1992 - lebensdauer + 1, 6 + ii - 2006 + J - 1)
```

```
                End If
```

```
            Next J
```

```
        Next i
```

```
    End If
```

```
    ii = ii + 1
```

```
Loop
```

```
turn_over = 0
```

```
' Der veränderte Neubestand wird berechnet
```

```
For i = 2006 To 2006 + ende_der_berechnungsperiode + 1
```

```
    If i = (startjahr + turn_over * lebensdauer) Then
```

```
        Cells(95, 6 + i - 2006).Value = Cells(94, 6 + i - 2006).Value + summe(21, 79, lebensdauer) '
```

```
Summe der Neugeräte
```

```
        turn_over = turn_over + 1 'Zählt die Anzahl der Turnover im Laufe der
Berechnungsperiode
```

```
    Else
```

```
        Cells(95, 6 + i - 2006).Value = Cells(94, 6 + i - 2006).Value
```

```
    End If
```

```
Next i
```

```
'quer-aufgefüllt bis lebensdauer abgelaufen unter der Berücksichtigung von verändertem
Neubestand
```

```
For w = 0 To ende_der_berechnungsperiode - 1
```

```
    If Cells(13, 6 + w).Value = startjahr And Cells(13, 6 + w).Value <
(ende_der_berechnungsperiode + 2006) Then
```

```
        Cells(28 + w, 6 + w).Value = Cells(95, 6 + w).Value
```

```
        For i = 1 To lebensdauer - 1
```

```
            Cells(28 + w, 6 + w + i).Value = Cells(28 + w, 6 + w + i - 1)
```

```
        Next i
```

```
    End If
```

```
    If Cells(13, 6 + w).Value > startjahr And Cells(13, 6 + w).Value <
(ende_der_berechnungsperiode + 2006) Then
```

```

Cells(28 + w, 6 + w).Value = Cells(28 + w - lebensdauer, 6 + w - 1).Value + Cells(96, 6 +
w).Value
For i = 1 To lebensdauer - 1
Cells(28 + w, 6 + w + i).Value = Cells(28 + w, 6 + w).Value
Next i
End If

```

'Referezdaten --> immer alles gegen die besten ersetzen --> Dieser Wert stellt so die technische Grenze dar!

```

Cells(185, 5 + w + 1).Value = Cells(93, 5 + w + 1).Value * Cells(1 + w + 121, 3).Value
Next w

```

```

If summe(21, 81, lebensdauer) = 0 Then
pro_anteil = 0
Else
pro_anteil = summe(21, 81, lebensdauer) / summe(21, 79, lebensdauer) ' Anteil der
getauschten in Prozent
End If

```

' eigene Verbrauchstabelle für Substitution

' Verbrauch berechnen "oberes Dreieck"

```

For u = 1 To 65

```

```

For i = 1 To 79

```

```

delta_preis = Cells(309, 6 + 1 + u).Value - Cells(309, 6 + u).Value

```

```

preis = Cells(309, 6 + u).Value

```

```

If Cells(13, 90 + u - 1).Value <= Cells(20, 75).Value Then

```

```

If Not Cells(13 + i, 6 + u - 1).Value = vbEmpty Then

```

' Vor Tauschaktion wird mit Durchschnitt"verbrauch" gerechnet

```

Cells(13 + i, 90 + u - 1).Value = Cells(13 + i, 6 + u - 1).Value * Cells(208 + i, 4).Value * (1
+ delta_preis / preis) ^ preis_elastizitaet * (1 + Cells(308, 6 + i).Value) ^ einkommens_elastizitaet

```

```

row_merker = 13 + i ' Für die Verbrauchskorrektur später weiter unten wichtig

```

```

col_merker = 90 + u - 1 ' Für die Verbrauchskorrektur später weiter unten wichtig

```

```

End If

```

```

End If

```

' Verbrauch berechnen "Rest" der Tabelle wird aufgefüllt

```

If Cells(13, 90 + u - 1).Value > Cells(20, 75).Value Then

```

```

If Not Cells(13 + i, 6 + u - 1).Value = vbEmpty Then

```

```

'If Cells(11, 78).Value = 1 Then

```

' Nach Tauschaktion wird auch mit Best"verbrauch" gerechnet

```

'Cells(13 + i, 90 + u - 1).Value = Cells(13 + i, 6 + u - 1).Value * Cells(208 + i, 3).Value *
(1 + delta_preis / preis) ^ preis_elastizitaet * (1 + Cells(308, 6 + i).Value) ^
einkommens_elastizitaet

```

```

'Else

```

' Nach Tauschaktion wird auch mit Durchschnitt"verbrauch" gerechnet

```

Cells(13 + i, 90 + u - 1).Value = Cells(13 + i, 6 + u - 1).Value * Cells(208 + i, 4).Value *
(1 + delta_preis / preis) ^ preis_elastizitaet * (1 + Cells(308, 6 + i).Value) ^
einkommens_elastizitaet

```

```

'End If

```

```

End If

```

```

End If

```

```

Next i

```

```

Next u

```

' VERBRAUCHSKORREKTUR: Korrektur der Verbrauchswerte der ausgetauschten Geräte (von x\_neu) im AUSTAUSCHJAHR

For u = 1 To 65

    If Cells(13, 90 + u - 1).Value = Cells(20, 75).Value Then

        Cells(row\_merker, 90 + u - 1).Value = (Cells(row\_merker + 94, 4).Value \* Cells(94, col\_merker).Value + ((1 - pro\_anteil) \* Cells(row\_merker + 94, 4).Value + pro\_anteil \* Cells(row\_merker + 94, 3).Value) \* summe(21, 79, lebensdauer)) \* (1 + delta\_preis / preis) ^ preis\_elastizitaet \* (1 + Cells(308, 6 + i).Value) ^ einkommens\_elastizitaet

        'Cells(row\_merker + lebensdauer, col\_merker + lebensdauer).Value = "xxxxx"

    End If

Next u

' Konsumerverhalten nach Turnover --> Abfrage ob Durchschnitt-gekauft oder Besttechnologie gekauft werden

'--> KORREKTUR:

'Der aktuelle Verbrauch ist ja mit Durchschnitt gerechnet und muss um die Einsparung an Energie vermindert werden

If Cells(11, 78).Value = 1 Then

    ' Nach Turnover wird auch mit Best"verbrauch" gerechnet da BEST-Technologie gekauft wird

    For jump = 1 To 10

        If startjahr + jump \* lebensdauer < ende\_der\_berechnungsperiode + 2006 Then

            unkorregierte\_wert = Cells(row\_merker + jump \* lebensdauer, col\_merker + jump \* lebensdauer).Value

            korregierte\_wert = unkorregierte\_wert - (summe(21, 81, lebensdauer) \*

Cells(row\_merker + 94 + jump \* lebensdauer, 3).Value) ' Einsparung muss abgezogen werden

            Cells(row\_merker + jump \* lebensdauer, col\_merker + jump \* lebensdauer).Value = korregierte\_wert

        End If

    ' Verbrauch über Lebensdauer konstant --> rausschreiben bis zum Austausch

    For i = 1 To lebensdauer

        Cells(row\_merker + (jump - 1) \* lebensdauer, col\_merker + i - 1 + (jump - 1) \* lebensdauer).Value = Cells(row\_merker + (jump - 1) \* lebensdauer, col\_merker + (jump - 1) \* lebensdauer).Value

    Next i

Next jump

Else

' Verbrauch über Lebensdauer konstant --> rausschreiben bis zum Austausch

For jump = 1 To 10

    For i = 1 To lebensdauer

        Cells(row\_merker + (jump - 1) \* lebensdauer, col\_merker + i - 1 + (jump - 1) \* lebensdauer).Value = Cells(row\_merker + (jump - 1) \* lebensdauer, col\_merker + (jump - 1) \* lebensdauer).Value

    Next i

Next jump

End If

End Sub