

Elektrisches Wirkungsgradmodell von Datacentern

Von Neil Rasmussen

White Paper Nr. 113

APC[®]
Legendary Reliability[®]

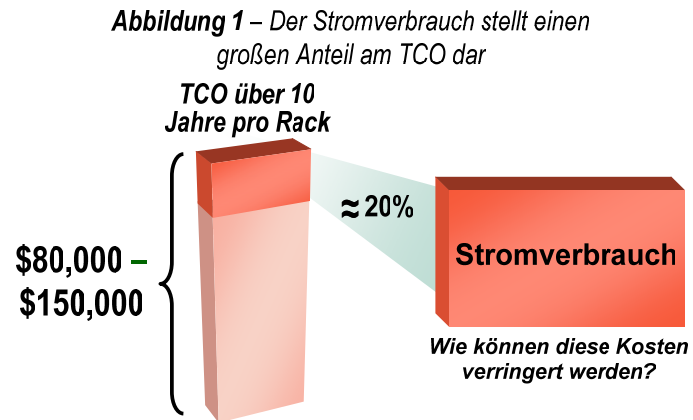
Zusammenfassung

Herkömmliche Modelle zum Bestimmen des elektrischen Wirkungsgrads von Datacentern geben für reale Installationen nur sehr ungenaue Werte wieder. Berechnungen der elektrischen Verluste entsprechen üblicherweise der Summe der Wirkungsgradverluste von verschiedenen elektrischen Geräten wie Strom- und Klimageräte. In diesem Dokument wird aufgezeigt, dass die üblicherweise für die Berechnung der Wirkungsgradverluste von Geräten verwendeten Werte sehr ungenau sind. Es wird ein einfacheres und genaueres Wirkungsgradmodell beschrieben, das eine rationale Basis zur Identifizierung und Quantifizierung der Verluste in Strom- und Kühlanlagen bietet.

Einführung

Über einen Zeitraum von 10 Jahren können die Gesamtbetriebskosten (TCO) für die physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke (NCPI) in einem typischen Datacenter zwischen 80.000 USD und 150.000 USD pro Rack betragen. Die Kosten für den Stromverbrauch stellen dabei mit einem Anteil von ca. 20 % einen erheblichen Faktor dar¹. Das ist deshalb von Bedeutung, da ein großer Teil der elektrischen Leistungsaufnahme in Form von

Wärmeenergieverlust verloren geht und ein erheblicher Teil dieses Verlustes vermieden werden kann. Schätzungen haben ergeben, dass Datacenter weltweit 40.000.000.000 kWh Strom pro Jahr verbrauchen. Es besteht sowohl ein großes Interesse der Öffentlichkeit als auch ein finanzielles Interesse der Betreiber von Datacentern daran, den mit diesem Verbrauch verbundenen Verlust zu verringern.²



Herkömmliche einfache Modelle für den Wirkungsgrad von Datacentern unterschätzen den Stromverlust in Datacentern erheblich. Der Anspruch auf einen verbesserten Wirkungsgrad ist demzufolge wesentlich größer als weithin angenommen. Dieses Dokument stellt ein verbessertes Modell vor, mit dem sich Datacenterverluste mit einer höheren Genauigkeit berechnen lassen, und zeigt Energiesparmöglichkeiten auf.

Was ist der „Datacenter-Wirkungsgrad“?

Die Effizienz eines Geräts oder Systems ist der Anteil des Einsatzes (Strom, Kraftstoff, je nachdem, womit es betrieben wird), der in das gewünschte nutzbare Ergebnis umgewandelt wird. Alles, das nicht als nutzbares Ergebnis erachtet wird, wird als „Verlust“ betrachtet. Der Anteil des nutzbaren Ergebnisses zum Gesamteinsatz wird üblicherweise als Prozentzahl dargestellt.

¹ Weitere Informationen über die Faktoren der Gesamtbetriebskosten finden Sie im APC-White Paper Nr. 6, „Ermitteln der Total Cost of Ownership (TCO) für Datacenter- und Serverraum-Infrastrukturen“.

² http://www.eei.org/magazine/editorial_content/nonav_stories/2004-01-01-NT.htm (Zugriff: 14. Juni 2006).

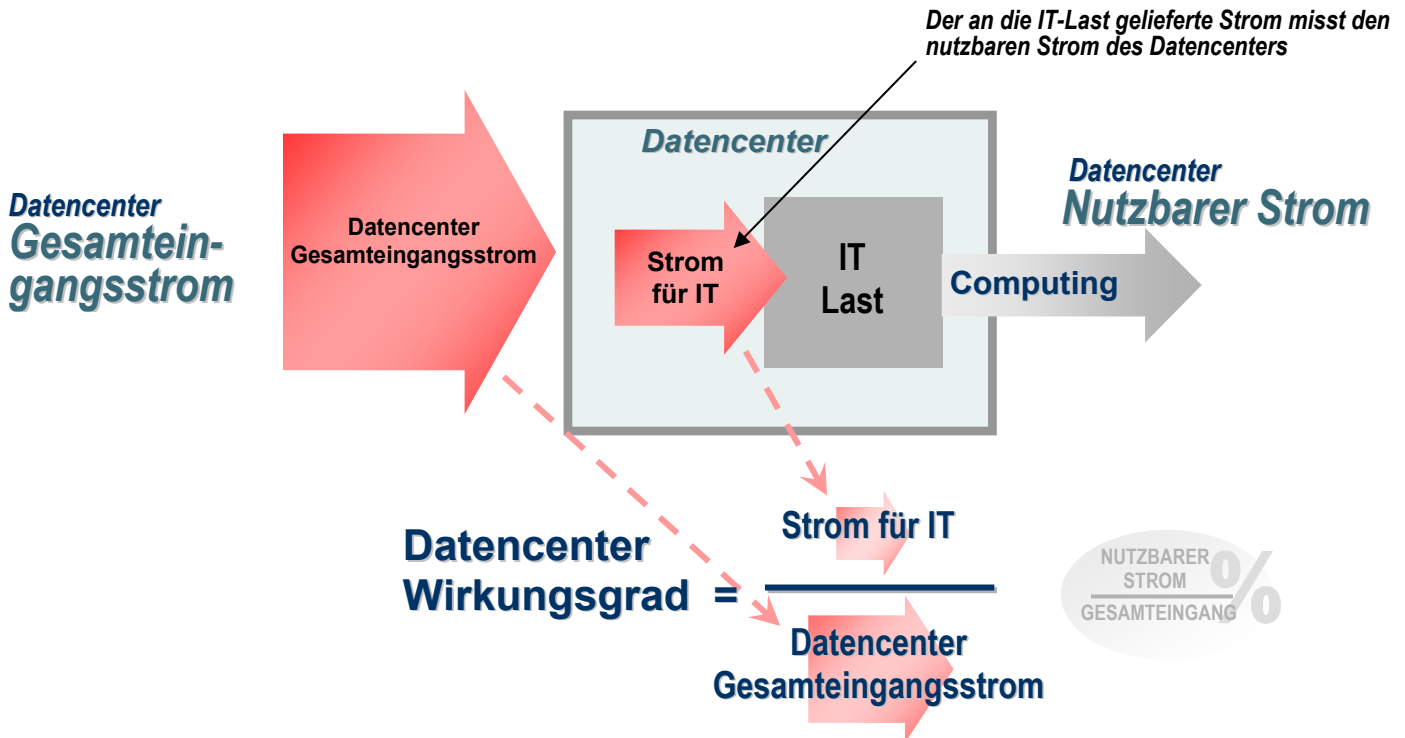
„Nutzbar“ ist, was als das gewünschte Ergebnis für ein bestimmtes System erachtet wird. Das hängt nicht nur von der Art des Systems ab, sondern auch vom Kontext der Verwendung. Beispielsweise kann bei einer Glühbirne, die 5 % Licht und 95 % Wärme abgibt, von einem Wirkungsgrad von 5 % als Glühbirne oder einem Wirkungsgrad von 95 % als Heizkörper gesprochen werden, abhängig davon, ob sie als Lichtquelle oder Wärmequelle in einem Raum verwendet wird. Als „Nutzprodukt“ wird somit alles erachtet, was unter den jeweiligen Umständen für das System Sinn ergibt.

Bezogen auf die physikalische Infrastruktur von Datacentern besteht der Einsatz aus *Strom* und das Nutzprodukt aus *Strom für die Datenverarbeitungsgeräte*. In diesem Dokument wird ein Datacenter als elektrisches System modelliert, dessen „Gesamteinsatz“ der Stromverbrauch vom Versorgungsnetz ist und dessen „nutzbares Ergebnis“ die Strommenge ist, die es für die Datenverarbeitung bereitstellt, sprich der Strommenge, die es an die IT-Geräte liefert.³

$$\text{Datacenter-Wirkungsgrad} = \frac{\text{IT-Leistungsaufnahme}}{\text{Gesamteingangstrom des Datacenters}}$$

Abbildung 2 zeigt dieses allgemeine Wirkungsgradmodell für Datacenter.

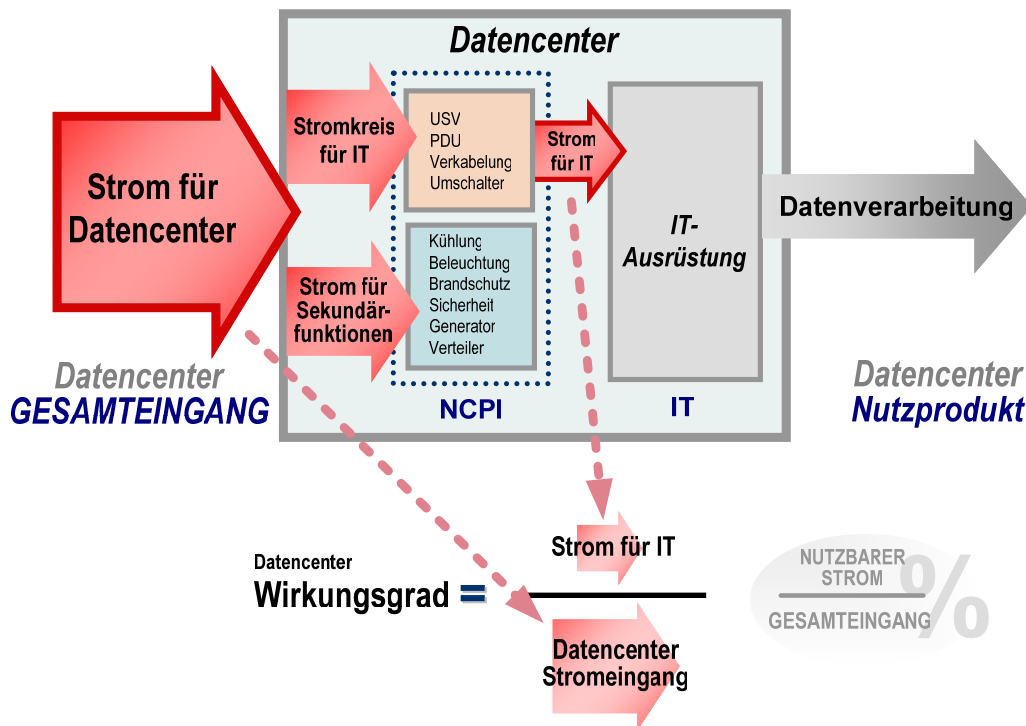
Abbildung 2 – Der Datacenter-Wirkungsgrad ist definiert als Teil der Gesamtstromaufnahme, die für die IT-Last benötigt wird



³ Die genaue Beziehung zwischen Stromverbrauch und „bewegten Bits“ ist nicht Gegenstand dieses White Papers. Für den Zweck der Analyse ist jedoch der Stromverbrauch durch IT-Geräte ein adäquater Maßstab für die geleistete Datenverarbeitung. Verbesserungen des Wirkungsgrads durch die Verringerung des Stromverbrauchs der IT-Geräte sind wichtig, aber nicht Inhalt dieses Dokuments.

Wenn das Datacenter einen Wirkungsgrad von 100 % aufweisen würde, würde die gesamte zugeführte Energie die IT-Lasten erreichen. In der Praxis gibt es zahlreiche Möglichkeiten, wie elektrische Energie nicht nur von den IT-Lasten, sondern auch von anderen Geräten verbraucht wird. Grund dafür sind die praktischen Anforderungen, IT-Geräte angemessen unterzubringen, mit Strom zu versorgen, zu kühlen und zu schützen, so dass eine ordnungsgemäße Datenverarbeitung möglich ist. (Das sind Aufgaben, für die die physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke (NCPI) des Datacenters zuständig ist.) Nicht-IT-Geräte, die Strom des Datacenters verbrauchen, sind beispielsweise Transformatoren, unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), Verkabelung, Lüfter, Klimaanlage, Pumpen, Befeuchter und Beleuchtung. Einige dieser Geräte wie USV und Transformatoren sind mit den IT-Lasten in Reihe geschaltet (die IT-Lasten liegen an dem Stromkreis, der sie mit Strom versorgt). Andere Geräte wie Beleuchtungskörper und Lüfter sind mit den IT-Lasten parallel geschaltet, da sie andere Unterstützungsfunktionen im Datacenter übernehmen. **Abbildung 3** zeigt die internen Komponenten für den Stromverbrauch im Modell des Datacenter-Wirkungsgrads.

Abbildung 3 – Auflistung des Stromverbrauchs im Modell des Datacenter-Wirkungsgrads



Die Begriffe „Nutzbar“ und „Verlust“ im Modell des Datacenter-Wirkungsgrads

In einem Wirkungsgradmodell wird alles, das nicht als Nutzprodukt des Systems definiert wurde, als „Verlust“ bezeichnet. Natürlich versorgt die NCPI (physikalische Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke) die IT-Lasten nicht nur mit Strom, sondern erfüllt auch sogenannte „Sekundärfunktionen“ (siehe **Abbildung 3**). Man könnte auch argumentieren, dass das Nutzprodukt dieser NCPI-Untersysteme (z. B. Kühlung oder Beleuchtung) als Teil des „Nutzprodukts“ des Datacenters angesehen werden muss.

Das hängt vom jeweiligen Bezugsrahmen ab. Gegenstand dieser Analyse ist der Gesamtwirkungsgrad des *Datacenters* bei der Herstellung des Nutzprodukts, der *Datenverarbeitung*. Datacenter werden nicht zum Zweck der Kühlung oder des Feuerschutzes oder einem anderen Vorteil von NCPI errichtet. Diese NCPI-Produkte sind äußerst nützlich für die *internen* Prozesse des Datacenters, da sie ihren Beitrag zum Erzeugen und Schützen des Nutzprodukts (Datenverarbeitung) leisten. Sie selbst sind jedoch weder „Nutzprodukt“ des Datacenters noch gibt es Grund zur Annahme, dass sie Strom verbrauchen *müssen*. Non-Power-Path-NCPI-Aktivitäten müssen als unvermeidbarer Faktor bei der Unterstützung der Datenverarbeitung des Datacenters angesehen werden. Deshalb werden sie im Modell des Datacenter-Wirkungsgrads als „Verlust“ gewertet, der soweit wie möglich verringert werden muss. Das sollte als potenzieller Ansatz für alternative Konzepte und neue Technologien zur Verringerung des Gesamtstromverbrauchs in Datacenter gelten. Es gibt beispielsweise Datacenter, die kostenfreie Kühlungsmethoden verwenden und mit Techniken wie Wärmerädern und Platten- und Rahmen-Kühlung kalte Außenluft nutzen. Dadurch kann der Verbrauch an elektrischer Energie für die Kühlung verringert und der Wirkungsgrad des Datacenters erhöht werden.

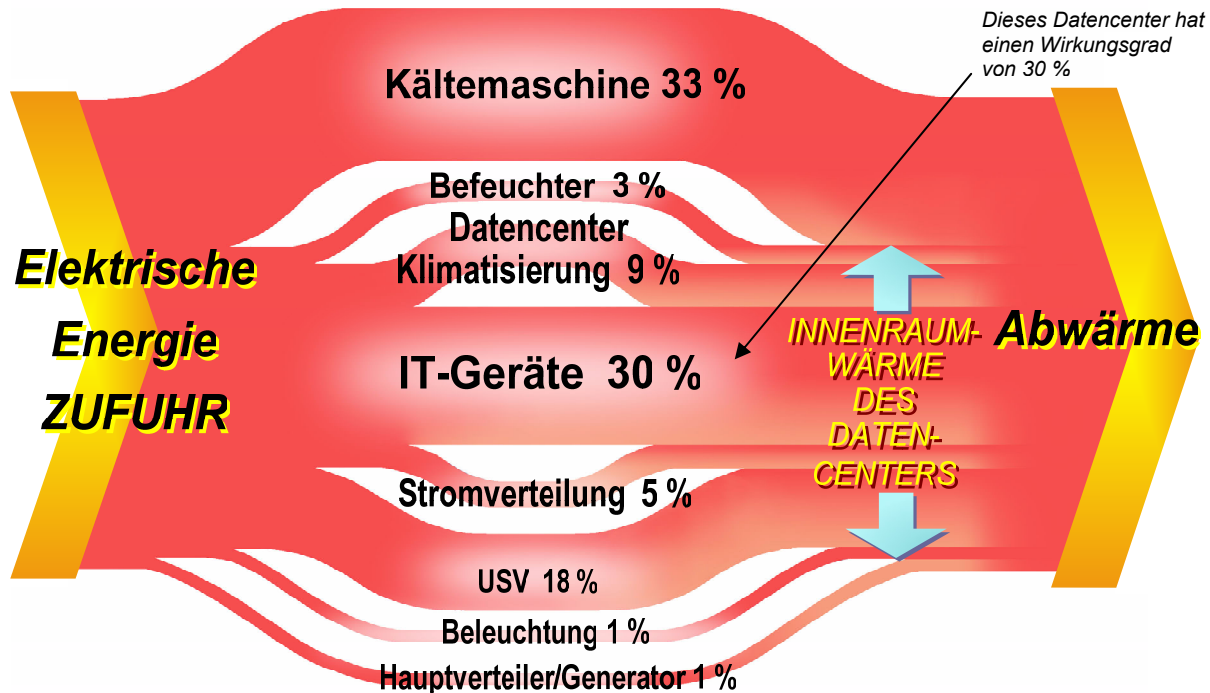
Die „Nutzprodukte“ der NCPI-Komponenten werden an anderer Stelle in diesem Dokument noch eine wichtige Rolle spielen: bei der Analyse des Wirkungsgrads der einzelnen Komponenten – einem kleineren Bezugsrahmen für den Wirkungsgrad innerhalb des Datacenters –, um die internen Wirkungsgradverluste im größeren Gesamtmodell des Datacenters zu verringern.

Wo wird elektrische Energie im Datacenter verbraucht?

Nahezu die gesamte Stromzufuhr für das Datacenter wird letztendlich in Wärme umgewandelt. In **Abbildung 4** ist ein Diagramm dargestellt, das den Fluss der elektrischen Energie und der Wärmeenergie in einem herkömmlichen Datacenter zeigt. Es ist eine Energieverbrauchsanalyse eines hochverfügbaren Datacenters mit doppelter Stromversorgung und N+1 CRAC-Einheiten, das mit einer typischen Auslastung von 30 % der Nennleistung betrieben wird. (In diesem Datacenter hat sich für die Auslastung und den Wirkungsgrad zufällig der gleiche Wert von 30 % ergeben, er ist jedoch von unterschiedlicher Bedeutung, obwohl geringe Auslastung und geringer Wirkungsgrad durchaus in einem Zusammenhang stehen. (Siehe spätere Ausführungen in diesem Dokument.)

Weniger als die Hälfte der aufgewendeten elektrischen Energie für ein Datacenter wird tatsächlich den IT-Lasten zugeführt. Das Datacenter in diesem Beispiel hat einen Wirkungsgrad von 30 %.

Abbildung 4 – Energiefluss in einem typischen Datacenter



Möglichkeiten zur Steigerung des Datacenter-Wirkungsgrads

Es gibt drei Möglichkeiten einen höheren Wirkungsgrad des Datacenters zu erzielen:

1. Internes Design der NCPI-Geräte verbessern, um bei Betrieb einen geringeren Stromverbrauch zu gewährleisten.
2. Größe der NCPI-Komponenten besser an die tatsächliche IT-Last anpassen („bedarfsgerechte Auslegung“), um einen höheren Wirkungsgrad der Komponenten zu erreichen.
3. Neue Technologien zur Verringerung des Strombedarfs für NCPI-Unterstützungsfunktionen (wie die bereits erwähnten kostenlosen Kühlmethode) entwickeln.

Richtigstellung von falschen Auffassungen über den Datacenter-Wirkungsgrad


Der Datacenter-Wirkungsgrad kann empirisch erhoben werden, indem der Stromverbrauch der gesamten IT-Ausrüstung addiert wird und durch die gesamte Leistungsaufnahme des Datacenters dividiert wird. Üblicherweise verlässt man sich jedoch bei großen Komponenten wie USV und CRACs auf die Herstellerangaben zum Wirkungsgrad. Das ist zwar weniger aufwändig, es wird jedoch normalerweise ein enorm nach oben abweichender Wirkungsgrad angegeben, der wenig hilfreich dabei ist, Möglichkeiten der Kosteneinsparung für elektrische Energie zu erkennen.

Der Wirkungsgrad eines Datacenters ist mehr als der Wirkungsgrad der Komponenten auf dem Typenschild

Hersteller machen Angaben zum Wirkungsgrad von Stromversorgungs- und Kühlanlagen.

Der Wirkungsgrad von Stromversorgungsanlagen wird üblicherweise als Prozentsatz der Division von Stromausgang durch Stromeingang angegeben.

Der Wirkungsgrad von Kühlanlagen wird üblicherweise als relativer Parameter, dem sogenannten „Leistungskoeffizient“, als Verhältnis von abgeführter Wärme zu Stromeingang angegeben.



Wirkungsgrad

$$= \frac{KW_{out}}{KW_{in}} \quad \text{bei voller Auslastung}$$

Die angegebenen Wirkungsgradwerte von anderen Herstellern für ähnliche Geräte unterscheiden sich nicht übermäßig. Deshalb kann man leicht den Schluss ziehen, dass die Wirkungsgradverluste eines Datacenters einfach durch Addieren der Wirkungsgradverluste der unterschiedlichen Komponenten bestimmt werden können.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass mit diesem Vorgehen nicht die richtigen Ergebnisse erzielt werden. Die

Verwendung der Wirkungsgradangaben der Hersteller hat zur Folge, dass Benutzer oder Konstrukteure den Wirkungsgrad *überschätzen* und demzufolge die Verluste von Datacentern *unterschätzen*.



Leistungskoeffizient

$$= \frac{KW \text{ abgeführte Wärme}}{KW_{in}}$$

Abbildung 6 – Hersteller geben nur eine Wirkungsgradzahl pro Komponente an

Falsche Auffassung

In **Tabelle 1** sind drei typische falsche Annahmen aufgelistet, die zu erheblichen Fehlern in Modellen des Datacenter-Wirkungsgrads führen können.

Tabelle 1 – Typische falsche Annahmen zum Datacenter Wirkungsgrad

Falsche Auffassung	Richtigstellung
1 Der Wirkungsgrad von Stromversorgungs- und Kühlanlagen ist konstant und unabhängig von der IT-Last.	Der Wirkungsgrad von Komponenten, insbesondere von CRAC-Einheiten und USV, sinkt bei geringerer IT-Last deutlich.
2 Die Stromversorgungs- und Kühlkomponenten werden mit bzw. nahezu mit der projektierten Auslastung betrieben.	Die übliche IT-Last <i>liegt deutlich unter</i> der Nennleistung der verwendeten NCPI-Komponenten.
3 Die von Stromversorgungs- und Kühlkomponenten erzeugte Wärme spielt kaum eine Rolle.	Die Abwärme von Stromversorgungs- und Kühlkomponenten ist ein maßgebliches Problem bei der Kühlung, das bei der Analyse der Wirkungsgradverluste des Kühlsystems berücksichtigt werden muss.

Diese schwerwiegenden Fehler verstärken sich gegenseitig, insbesondere bei niedrigen IT-Lasten, die bei den meisten Datacentern häufig vorkommen. **Somit werden die elektrischen Verluste regelmäßig um den Faktor 2 oder sogar 3 unterschätzt.**

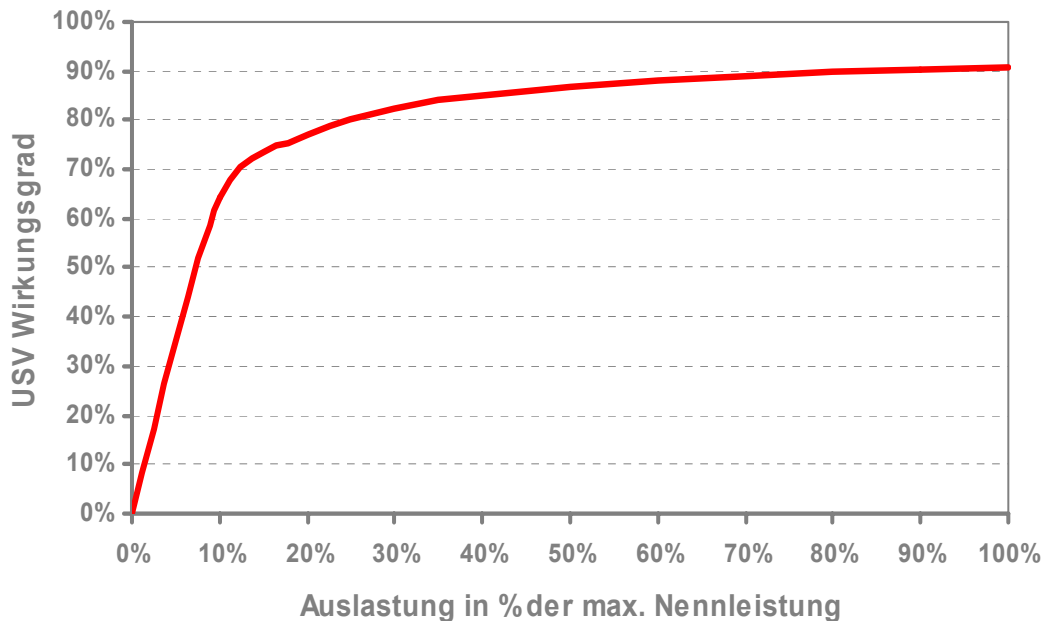
Es kann jedoch ein einfaches Modell konstruiert werden, das die oben angegebenen Punkte berücksichtigt und verlässlichere Schätzungen des Wirkungsgrades ermöglicht.

Verbesserte Modelle für den Wirkungsgrad von Komponenten

Ein verbessertes Modell des Gesamtwirkungsgrads eines Datacenters hängt von der Modellierungsgenauigkeit der einzelnen Komponenten wie USV ab. Es ist üblich, für die Stromversorgungs- und Kühlkomponenten einen Wirkungsgradwert anzugeben. Diese Methode spiegelt jedoch nicht die realen Datacenter wider. Der tatsächliche Wirkungsgrad einer Komponente wie USV ist nicht konstant, sondern eine Funktion der IT-Last. **Abbildung 7** zeigt eine typische Form einer USV-Wirkungsgradkurve.

Falsche Auffassung Nr. 1
Wirkungsgrad von Stromversorgungs- und Kühlanlagen ist konstant und unabhängig von der IT-Last.

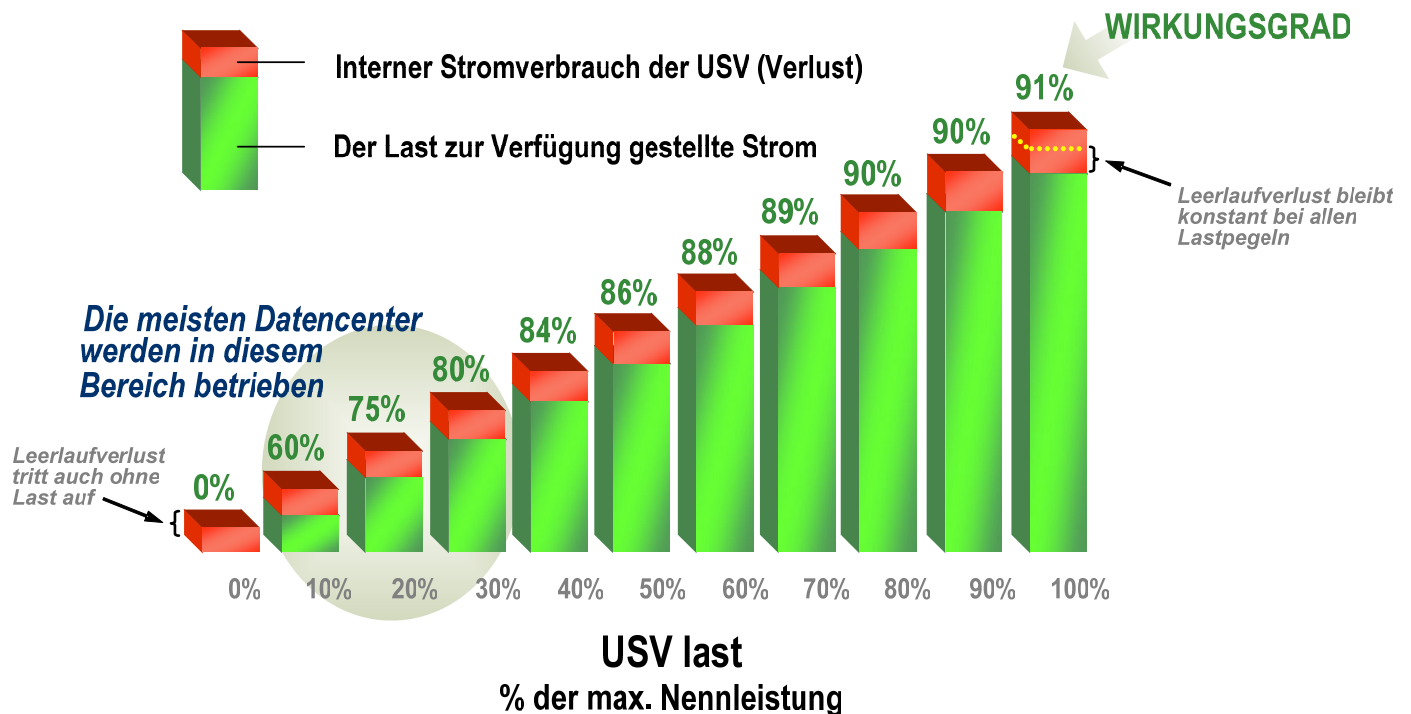
Abbildung 7 – Typischer Wirkungsgrad einer USV als Funktion der Last



Bei sehr geringen Lasten nähert sich der Wirkungsgrad des Geräts an Null an. Die Ursache dafür liegt in Verlusten wie z. B. Steuerlogikverlusten, die unabhängig von der Last sind. Dieser konstante Verlust, der unabhängig von der Last ist, wird unterschiedlich bezeichnet: *Leerlaufverlust*, *fester Verlust*, *Shunt-Verlust*, *Tara-Verlust* oder *paralleler Verlust*. In diesem Dokument wird der Begriff **Leerlaufverlust** verwendet.

Abbildung 8 ist eine andere Darstellung der Daten aus **Abbildung 7**. Bei sinkender Last wird der Anteil des internen Stromverbrauchs der USV (der „Verlust“ ist mit der Farbe Rot gekennzeichnet) gegenüber dem Gesamtstromverbrauch kontinuierlich größer. Somit verringert sich der Prozentwert des Wirkungsgrads. Der Grund dafür liegt am Anteil der Leerlaufverluste, die unabhängig von der Last konstant bleiben.

Abbildung 8 – Auswirkung des internen USV-Verlusts auf den Wirkungsgrad



Die in **Abbildungen 7** und **8** dargestellte USV kann mit einem Wirkungsgrad von 91 % beschrieben werden. Das ist jedoch der Wirkungsgrad bei *voller Auslastung* oder im „besten Fall“. Bei geringer Auslastung, bei der die meisten Datacenter betrieben werden, kann keineswegs mehr von einem Wirkungsgrad von 91 % gesprochen werden. Bei einer Auslastung von 10 % derselben USV wird nur noch ein Wirkungsgrad von 60 % erreicht. Hier kann eindeutig kein Wirkungsgradmodell mit nur einem Parameter verwendet werden.

Die drei Arten von internen Geräteverlusten

Bei einer genaueren Betrachtung der **Abbildung 8** wird deutlich, dass der Geräteverlust (der rote Abschnitt der Balken) mit größerer Auslastung *steigt*. Das hängt neben dem Leerlaufverlust mit einem zusätzlichen Verlust zusammen, der proportional zur Auslastung ist. Es kann zudem noch eine weitere Verlustkomponente auftreten (nicht im Diagramm ersichtlich), die proportional zum Quadrat der Auslastung ist. Dieser Verlust ist normalerweise von geringer Bedeutung. Bei höheren Lasten kann er jedoch zu einer Reduzierung des Wirkungsgrads führen.

In **Tabelle 2** werden typische Werte der drei Verlustarten für verschiedene Geräte in einem Datacenter aufgelistet. In der letzten Spalte ist die Summe der Verluste des Komponenten angegeben.

Tabelle 2: Typische elektrische Verluste von NCPI-Komponenten, wiedergegeben als Anteil an der max. Nennlast der Komponente

NCPI-Komponente	Leerlaufverlust +	Proportionaler Verlust +	Quadratischer Verlust =	Gesamtverlust (ein Parameter)
USV	4%	5%	-	9%
PDU	1.5%	-	1.5%	3%
Beleuchtung	1%	-	-	1%
Verkabelung	-	-	1%	1%
Umschalter	-	-	0.5%	0.5%
Generator	0.3%	-	-	0.3%
CRAC	9%	0%	-	9%
Luftbefeuchter	1%	1%	-	2%
Wärmetauscher/ Chilleranlage	6%	26%	-	32%

Aus **Tabelle 2** ist ersichtlich, dass durch das Ermitteln von maximal zwei Werten pro Gerät, ein vollständigeres Modell für die im Datacenter verwendeten Komponenten erstellt werden kann. Verluste sind in dieser Tabelle als Prozentsatz der **maximalen Nennlast** der Komponente wiedergegeben. Wenn die tatsächliche Last geringer als die Nennlast ist, ändert sich der Prozentsatz wie folgt:

- Leerlaufverlust: Bei sinkender Last **steigt** der Verlustprozentsatz
- Proportionaler Verlust: Verlustprozentsatz bleibt konstant (unabhängig von der Last)
- Quadratischer Verlust: Bei sinkender Last **sinkt** der Verlustprozentsatz

Mit nur einem Wirkungsgradparameter könnte der typische USV-Wirkungsgrad in **Abbildung 7** und **8** nicht genau modelliert werden. Deshalb wurde er mithilfe der Parameter für den Leerlaufverlust (4 %) und für den proportionalen Verlust (5 %) aus **Tabelle 2** modelliert.

Auswirkung einer Unterauslastung auf die Komponenteneffizienz

Im vorherigen Abschnitt wurde deutlich, dass der Wirkungsgrad von Stromversorgungs- und Kühlsystemen erheblich nachlässt, wenn die Komponenten unter ihrer Nennleistung betrieben werden. Daraus ergibt sich, dass bei jeder Analyse des Datacenter-Wirkungsgrads die Last als prozentualer Anteil an der Nennleistung berücksichtigt werden muss.

Falsche Auffassung Nr. 2

Die Stromversorgungs- und Kühlkomponenten werden mit bzw. nahezu mit der projektierten Auslastung betrieben.

Bei einfachen Effizienzmodellen, die lediglich einen einzigen Effizienzwert für die Gerätemodellierung verwenden, fließt die Last nicht in die Analyse mit ein, d. h. der Wirkungsgrad ändert sich nicht lastabhängig. Dabei ist es unbestritten, dass die Stromversorgungs- und Kühlsysteme in durchschnittlichen Datacentern deutlich unter Nennlast gefahren werden. Die erwähnten Modelle führen dazu, dass der Wirkungsgrad der Datacenter deutlich zu hoch angesetzt wird.

Unabhängig von der Art der Stromversorgungs- oder Kühlkomponente gibt es vier Gründe, weshalb die Komponenten in der Praxis nicht ihre Nennleistung erreichen. Diese lauten:

- **Die IT-Last des Datacenters liegt unter der Nennleistung der Komponente.**
- **Die Komponente wurde absichtlich überdimensioniert, um einen Sicherheitsspielraum zu erhalten.**
- **Die Komponente wird im Verbund mit ähnlichen Komponenten in einer N+1- oder 2N-Konfiguration genutzt.**
- **Die Komponente wurde überdimensioniert, um eine höhere Lastflexibilität zu erhalten.**

Die IT-Last liegt unter der Nennleistung. Studien zeigen eindeutig, dass Datacenter in der Regel um 65 % unter ihrer Nennlast liegen. Dieses Thema wird ausführlicher im APC-White Paper Nr. 37 „Überdimensionierte Datacenter und Netzwerkraum-Infrastrukturen: Kostenvermeidung“ beschrieben. Die folgenden Abschnitte zeigen auf, dass eine Unterauslastung in erheblichem Maße zu den Wirkungsgradverlusten von Datacentern beiträgt.

Die Komponente wurde absichtlich überdimensioniert, um einen Sicherheitsspielraum zu erhalten. Die Überdimensionierung von Komponenten entspricht einer häufig praktizierten Vorgehensweise, die auch als Leistungsherabsetzung (Derating) bezeichnet wird. Sie soll verhindern, dass Komponenten an ihrer Leistungsgrenze betrieben werden. Selbstverständlich können Anlagen auch ohne Leistungsherabsetzung betrieben werden; ein Derating von 10 bis 20 % entspricht bei hochverfügbaren Anlagen jedoch gängiger Praxis.

Die Komponente wird in einer redundanten N+1- oder 2N-Konfiguration genutzt.

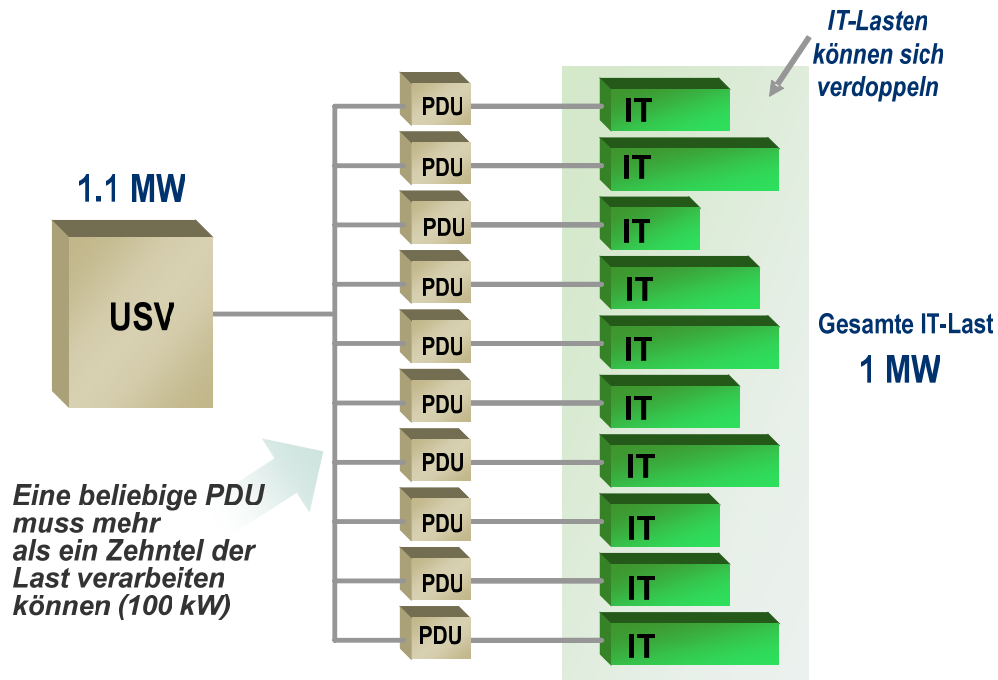
Eine N+1- oder sogar 2N-Konfiguration wird häufig gewählt, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen und/oder die gleichzeitige Wartung mehrerer Komponenten zu ermöglichen, ohne dass das System als Ganzes heruntergefahren werden muss. Wenn Datacenter in einer derartigen Konfiguration betrieben werden, verteilt sich die IT-Last auf mehr NCPI-Komponenten, wodurch sich die Auslastung der einzelnen Komponenten verringert. Bei einem 2N-System erreicht die Auslastung pro Komponente nur die Hälfte des jeweiligen Nennwerts. Daraus ergibt sich, dass der Wirkungsgrad von Datacentern in hohem Maße davon abhängt, ob eine N+1- oder 2N-Konfiguration gegeben ist.

Die Komponente wurde überdimensioniert, um eine höhere Lastflexibilität zu erreichen.

Dieser Effekt ist subtil und lässt sich am besten anhand eines Beispiels veranschaulichen. Dabei soll ein Datacenter mit einer 1-MW-Last von einer USV mit 1,1 MW abgesichert werden. Zwischen der USV und den IT-Lasten befinden sich zehn Stromverteiler (PDUs), die jeweils einen Teil der IT-Lasten versorgen. Die Frage lautet: Wie lauten die Nennwerte dieser PDUs, und mit welcher Leistung arbeiten sie bei einer durchschnittlichen Last? Auf den ersten Blick scheint klar zu sein, dass für das Systemdesign idealerweise ein Nennwert von 100 kW pro Komponente gegeben sein sollte. Wenn jeder Stromverteiler dazu noch mit Vollast betrieben würde, könnte das Datacenter die gesamte Last abdecken. In der Realität ist es jedoch nahezu unmöglich, eine gleichmäßige Lastverteilung auf die PDUs eines Datacenters zu erreichen. Vielmehr wird die PDU-Last durch die Art der IT-Systeme in dem Bereich des Datacenters bestimmt, in dem sich der betreffende Stromverteiler befindet. In der Praxis weisen die einzelnen PDUs eines Datacenters häufig eine um den Faktor 2 abweichende Last auf. Wenn eine PDU einen Datacenterbereich versorgt, der physisch zwar mit Vollast betrieben wird, jedoch nicht die gesamte Leistungskapazität des Stromverteilers in Anspruch nimmt, dann kann die verbleibende PDU-Leistung nicht genutzt werden, wenn die übrigen neun PDUs mit Vollast laufen. Bei dieser Konfiguration lässt sich die volle Leistungskapazität des Datacenters nur realisieren, indem die PDU-Gesamtleistung deutlich überdimensioniert wird. Hierfür kommt in der Regel eine Überdimensionierung in der Größenordnung von 30 bis 100 % zum Einsatz. Wie weiter oben verdeutlicht, verringert eine Überdimensionierung jedoch den Wirkungsgrad des Systems. **Abbildung 9** zeigt den Zusammenhang zwischen Lastflexibilität und PDU-Überdimensionierung.

Dabei ist zu beachten, dass das zugrunde liegende Problem nicht nur zu überdimensionierten PDUs, sondern auch zu überdimensionierten Lüftungsanlagen führt.

Abbildung 9 – Auswirkung von Lastflexibilität auf die PDU-Dimensionierung



Auswirkung der Abwärme von Stromversorgungs- und Kühlsystemen

Eine weitere wichtige Fehlerquelle bei der Modellierung des Wirkungsgrads von Datacentern besteht in der Annahme, dass die Abwärme von Stromversorgungs- und Klimaanlage (Wirkungsgradverlust) lediglich einen unbedeutenden Anteil an der IT-Last ausmacht und daher ignoriert werden kann. Tatsache ist jedoch, dass kein Unterschied zwischen der Abwärme der Stromversorgungs- und Klimaanlage in einem Datacenter und der Abwärme der IT-Systeme selbst besteht. In beiden Fällen muss die Abwärme von einem Kühlsystem abgeleitet werden.

Dies bedeutet eine zusätzliche Belastung für das Kühlsystem, woraus sich die Notwendigkeit einer Überdimensionierung mit den daraus resultierenden zusätzlichen Wirkungsgradverlusten ergibt. Um diese Verluste korrekt quantifizieren zu können, muss die Kühllast sowohl die IT-Systeme als auch sämtliche Stromversorgungs- und Kühlvorrichtungen berücksichtigen, die sich in dem klimatisierten Bereich befinden.

Falsche Auffassung Nr. 3

Die von Stromversorgungs- und Kühlkomponenten erzeugte Wärme spielt kaum eine Rolle.

Die Lösung: Ein verbessertes Modell für den Datacenter-Wirkungsgrad

Ausgehend von den obigen Überlegungen lässt sich ein Modell entwickeln, mit dem die Effizienz von Datacentern sehr viel besser ermittelt werden kann. Es zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Die Modellierung der Komponenten erfolgt unter Einbeziehung des Leerlaufverlusts, eines Verlustfaktors, der proportional zur Last ist, sowie eines Verlustfaktors, der proportional zum quadratischen Verlust ist.
- Die Überdimensionierung aufgrund des Komponenten-Derating wird von vornherein berücksichtigt.
- Die Unterauslastung aufgrund von N+1- oder 2N-Architekturen wird mit einbezogen.
- Die Kühllast beinhaltet sowohl die IT-Systeme als auch Abwärme, die von internen Stromversorgungs- und Kühleinheiten erzeugt wird.
- Für eine gegebene Datacenterinstallation wird der Wirkungsgrad als eine Funktion der Last grafisch dargestellt, wobei vorausgesetzt wird, dass typische Datacenter weiter unter ihrer Nennleistung betrieben werden.

Die praktische Umsetzung des Modells ist einfach und sieht folgendermaßen aus:

- Ermittlung der durchschnittlichen Überdimensionierung für jede Art von Stromversorgungs- oder Kühlkomponente unter Berücksichtigung der Faktoren Leistungsherabsetzung, Lastflexibilität und Redundanz
- Ermittlung der Betriebsverluste für jede Komponententyp unter Berücksichtigung von Eingangslast, Anteil an der Nennlast für die Komponententyp auf Basis der Überdimensionierung, Leerlaufverlust und proportionalem Verlust
- Ermittlung zusätzlicher proportionaler Verluste aufgrund der Kühlung von Stromversorgungs- und Klimaanlage in dem Datacenter durch das Kühlsystem
- Addierung aller Verluste
- Berechnung und tabellarische Darstellung als eine Funktion der IT-Last des Datacenters

Mit einem Computermodell auf dieser Grundlage wurde der Stromverbrauch gemäß dem von APC entwickelten Verfahren für die TCO-Analyse von Datacentern berechnet (siehe APC White Paper Nr. 6, „Ermitteln der Total Cost of Ownership (TCO) für Datacenter- und Serverraum-Infrastrukturen“).

Systeme mit mehreren Betriebsarten

Bestimmte NCPI-Teilsysteme wie beispielsweise Klimaanlage verfügen unter Umständen über mehrere Betriebsarten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden. Dies kann z. B. ein Energiesparmodus bei niedrigen Außentemperaturen sein, in dem das System einen deutlich höheren Wirkungsgrad erreicht.

Derartige Systeme lassen sich mit einer einfachen Wirkungsgradkurve, die in diesem White Paper beschrieben wurde und lediglich die drei Parameter Leerlaufverlust, proportionaler und quadratischer Verlust berücksichtigt, nicht modellieren. Um ein Wirkungsgradmodell für Multimode-Systeme zu erhalten, wird ein anderer Ansatz benötigt, der in der Technik gängig und anerkannt ist.

Systeme, die zwischen verschiedenen Betriebsarten hin- und herschalten, lassen sich über einen längeren Zeitraum mit einer einfachen Methode, dem so genannten State-Space-Averaging, modellieren. Dabei wird die relative Verweildauer in den einzelnen Betriebsarten gemessen und dann ein gewichteter Durchschnittswert der Systemausgangsleistung ermittelt. Das Verfahren eignet sich hervorragend für die Berechnung von Wirkungsgrad und Verlusten.

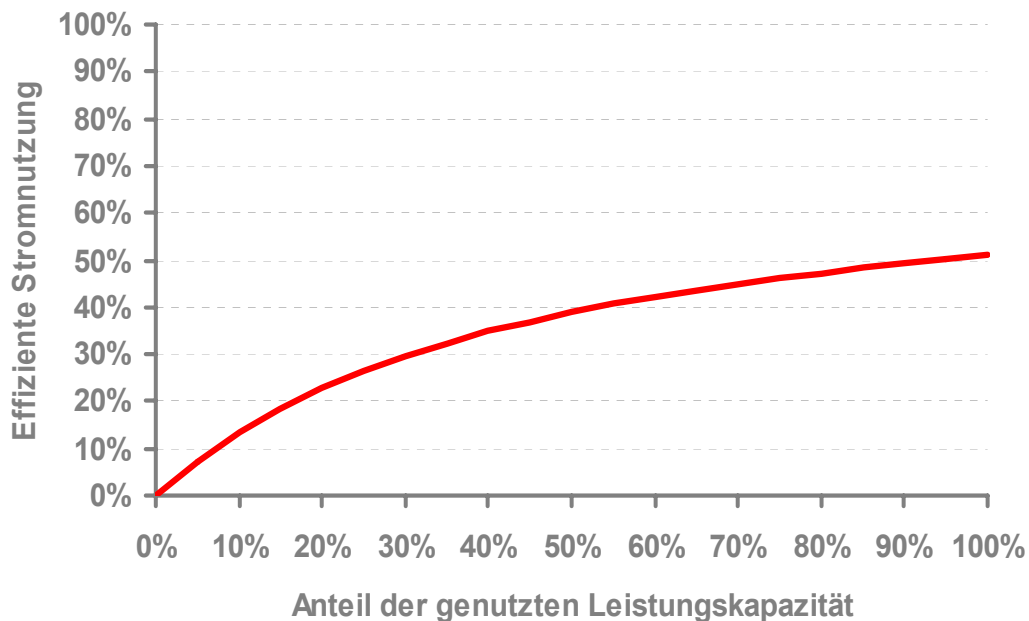
Um das hier beschriebene Effizienzmodell auf NCPI-Systeme mit mehreren Betriebsarten anwenden zu können, müssen für jede Betriebsart die Leerlaufverluste sowie die proportionalen und quadratischen Verluste bestimmt werden. Danach wird der Anteil am Gesamtverlust über einen längeren Zeitraum hinweg berechnet, indem der Verlust in einer bestimmten Betriebsart mit der erwarteten Verweildauer in dieser Betriebsart multipliziert wird. Damit werden für die vollständige Beschreibung eines Systems mit zwei Betriebsarten drei Wirkungsgradkurven benötigt:

- Wirkungsgradkurve in Betriebsart 1
- Wirkungsgradkurve in Betriebsart 2
- Erwartete Gesamt-Wirkungsgradkurve unter Annahme einer bestimmten Verweildauer pro Betriebsart

Der Wirkungsgrad von Datacentern in der Praxis

Dank einem aussagekräftigeren Modell für den Stromverbrauch von Datacentern lassen sich auch bessere Aussagen zum Wirkungsgrad der Datacenter treffen. Unter Zuhilfenahme typischer Wert für Systemverluste, Leistungsherabsetzung, Lastflexibilität, Überdimensionierung und Redundanz kann die Wirkungsgradkurve aus **Abbildung 10** entwickelt werden.

Abbildung 10 – Wirkungsgrad eines typischen Datacenters unter Verwendung des verbesserten Modells



Dabei ist zu beachten, dass diese Darstellung von Wirkungsgrad gegenüber Last erheblich von den Ergebnissen abweicht, die mit herkömmlichen, auf den Herstellergaben zum Wirkungsgrad basierenden Berechnungen erzielt werden. **Bei der herkömmlichen Effizienzermittlung des Datacenters aus Abbildung 10 ergäbe sich ein lastunabhängiger Wert von 60 bis 70 %.** Auffallend ist hier, dass das verbesserte Modellierungsverfahren insbesondere bei den niedrigen Lastpegeln, die der realen Datacentersituation entsprechen, zu einem drastisch geringeren Wirkungsgrad kommt.

Das Modell zeigt, dass Datacenter mit sehr geringer Last unter Umständen geradezu dramatische Einbußen des Wirkungsgrads verzeichnen. Wenn ein Datacenter z. B. nur mit 10 % seiner Nennleistung betrieben wird, wird pro 10 Watt Eingangsleistung lediglich 1 Watt an die IT-Systeme weitergegeben. Die verbleibenden 9 Watt gehen aufgrund von Wirkungsgradverlusten in der physikalischen Infrastruktur für hochverfügbare Netzwerke verloren.

Die Verluste lassen sich jedoch auch unter finanziellen Gesichtspunkten betrachten. **Abbildung 11** stellt die jährlichen Stromkosten eines 1-MW-Datencenters als eine Funktion seiner IT-Last dar. Dies basiert auf einem typischen Hochverfügbarkeitsdesign mit doppelter Stromversorgung und N+1 CRAC-Einheiten. Für die Analyse werden Kosten von 0,10 USD pro kW/h veranschlagt.

Abbildung 11 – Jahresstromkosten für ein typisches 1-MW-Datencenter, dargestellt als eine Funktion des Anteils der tatsächlich genutzten Nennleistung

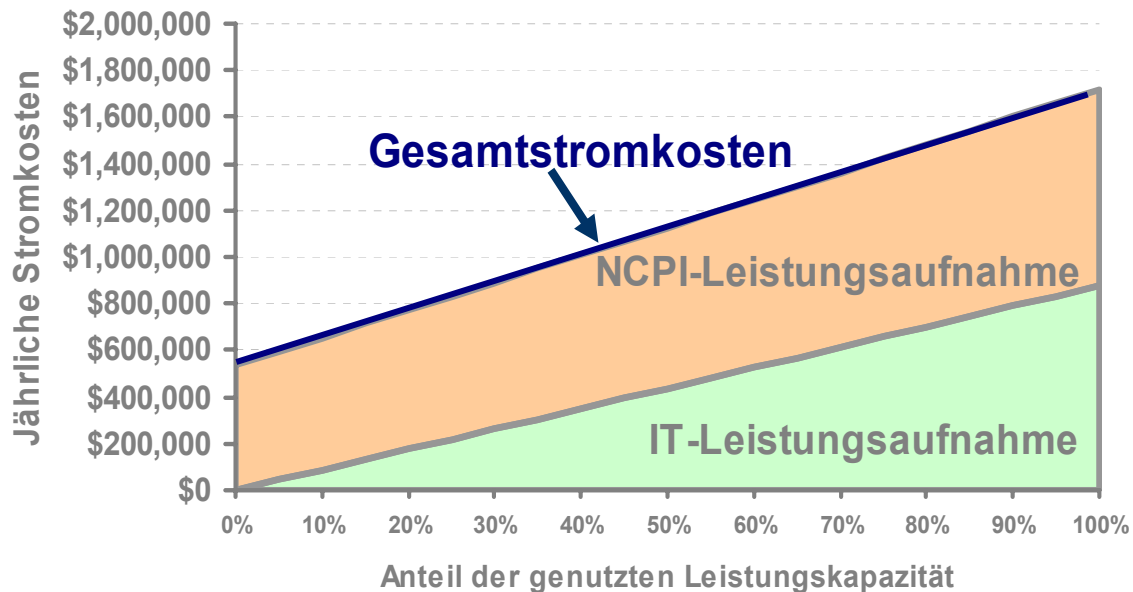


Abbildung 11 zeigt, dass die Gesamtstromkosten eines 1-MW-Datencenters je nach IT-Last zwischen 600.000 und 1.700.000 USD pro Jahr betragen. Dabei ist zu beachten, dass auch bei völligem Fehlen einer IT-Last Kosten von über 500.000 USD pro Jahr auflaufen, die durch den Wirkungsgradverlust von Stromversorgungs- und Kühlsystemen entstehen. **Bei einer typischen Datencenterlast von 30 % werden mehr als 70 % der Stromkosten durch Wirkungsgradverluste von Stromversorgungs- und Kühlsystemen verursacht.**

Der Gewinn: Ein höherer Datacenter-Wirkungsgrad

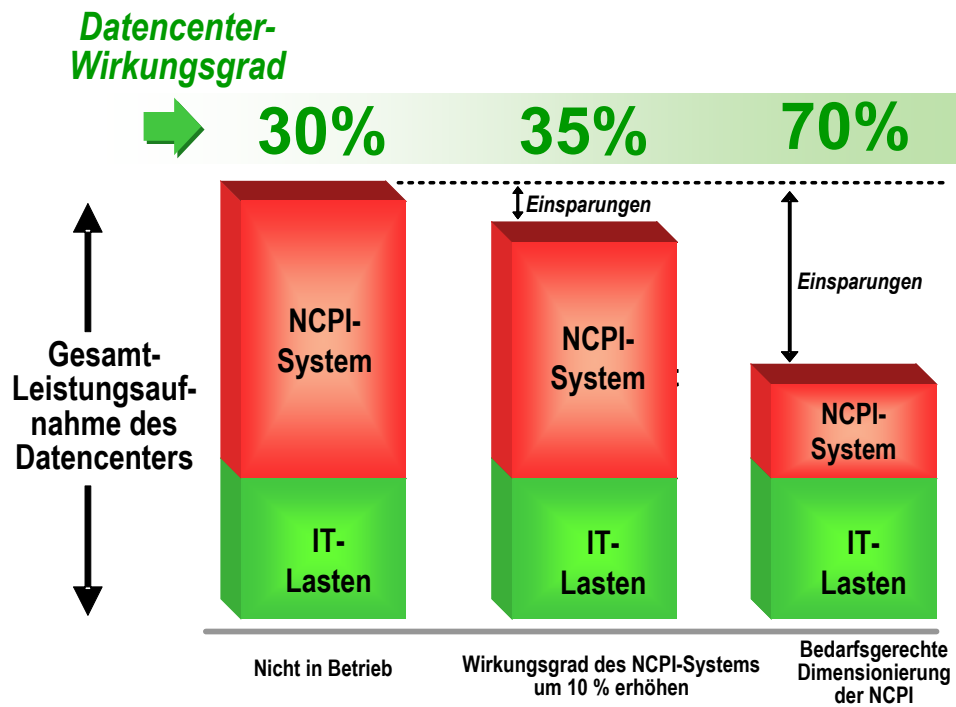
Das Modell zeigt deutlich, dass die Stromkosten von Datacentern in erster Linie durch Leerlaufverluste von Infrastrukturkomponenten entstehen. Diese liegen üblicherweise über dem Stromverbrauch durch die IT-Last. Interessant ist hier, dass Leerlaufverluste bei der herkömmlichen Analyse ignoriert werden; vielmehr wird aus den Produktspezifikationen deutlich, dass die Hersteller häufig auf die wichtige Angabe der Leerlaufverluste von Stromversorgungs- und Kühleinheiten verzichten.

Durch eine Analyse der Daten lassen sich Möglichkeiten, mit denen Verluste reduziert und die Betriebseffizienz von Datacentern gesteigert werden können, schnell aufzeigen und nach ihrer Priorität ordnen:

- Das bei weitem größte Einsparpotenzial bietet eine geringere Überdimensionierung der Datacenter durch den Einsatz einer anpassbaren, modularen Architektur, die die Abstimmung der Stromversorgungs- und Kühlinfrastruktur auf die jeweilige Last ermöglicht. **Potenzial für die Verlustreduzierung: 50%.**
- Verbesserung des Wirkungsgrads von Kühlsystemen. **Potenzial für die Verlustreduzierung: 30%**
- Verringerung der Leerlaufverluste von Stromversorgungs- und Kühlkomponenten im Datacenter. **Potenzial für die Verlustreduzierung: 10%**

Abbildung 12 zeigt die möglichen positiven Auswirkungen durch einen höheren Wirkungsgrad der Komponenten und eine geringere Überdimensionierung. Eine ausführliche Erörterung dieser Thematik finden sie im APC White Paper Nr. 114, *Die Umsetzung energiesparender Datacenter*.

Abbildung 12 – Der Gewinn: Ein höherer Datacenter Wirkungsgrad



Ergebnisse

Herkömmliche Modelle der Datencentereffizienz ergeben häufig einen zu hohen Wirkungsgrad, da sie weder die Überdimensionierung der Systeme noch die Verringerung des Wirkungsgrads infolge der reduzierten Lastpegel berücksichtigen, mit denen Datacenter üblicherweise betrieben werden. Ein verbessertes Modell liefert hier sehr viel genauere Werte für die Datencentereffizienz und erlaubt Rückschlüsse darauf, wo Verluste entstehen und wie sie sich vermeiden lassen.

Typische Datacenter haben einen *mehr als zwei Mal* so hohen Strombedarf, als dies durch die betreffenden IT-Lasten gerechtfertigt ist. Die durch diese Leistungsaufnahme entstehenden Stromkosten machen einen erheblichen Teil der Gesamtbetriebskosten aus. Ein über den Leistungsbedarf der IT-Systeme hinausgehender Stromverbrauch ist grundsätzlich nicht erwünscht und lässt sich weitgehend vermeiden.

Der mangelnde Wirkungsgrad von Datacentern lässt sich primär auf die Überdimensionierung zurückführen. Daraus ergibt sich, dass skalierbare, an die IT-Last anpassbare Lösungen ein spürbares Potenzial für die Verringerung von unnötigem Stromverbrauch und übermäßigen Kosten bieten. Das Einsparpotenzial bei einem typischen 1-MW-Datacenter beläuft sich über eine Nutzlebensdauer von 10 Jahren hinweg auf beeindruckende 2.000.000 bis 4.000.000 USD.

Aufgrund der drastischen Auswirkungen des Wirkungsgradverlustes auf Stromverbrauch und Kosten sollten diese Verluste im Zentrum des Interesses von Datacenterbetreibern und Öffentlichkeit gleichermaßen stehen.

Über den Autor:

Neil Rasmussen ist einer der Gründer und Chief Technical Officer von American Power Conversion. Bei APC arbeitet Neil Rasmussen mit dem weltgrößten F&E-Budget für die Stromversorgungs-, Kühlungs- und Rack-Infrastruktur kritischer Netzwerke. Die wichtigsten Produktentwicklungszentren befinden sich in Massachusetts, Missouri, Rhode Island, Taiwan, Dänemark und Irland. Zurzeit leitet er die APC-Initiative zur Entwicklung von modular skalierbaren Datacenterlösungen und ist als Hauptarchitekt verantwortlich für die Entwicklung des InfraStruXure-Systems von APC.

Vor der Gründung von APC im Jahre 1981 graduierte Neil Rasmussen am MIT zum Bachelor und Master in Elektrotechnik. Hier veröffentlichte er auch seine Dissertation zur Analyse einer 200 MW-Stromversorgung des Tokamak-Fusionsreaktors. Von 1979 bis 1981 arbeitete er bei den MIT Lincoln Laboratories an der Entwicklung von Schwungrad-Energiespeichersystemen und Solarstromsystemen.