



(11) **EP 2 762 989 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
06.08.2014 Patentblatt 2014/32

(51) Int Cl.:
G05F 1/565^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **13191801.3**

(22) Anmeldetag: **06.11.2013**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME

- **Henker, Ronny**
01307 Dresden (DE)
- **Eickhoff, Ralf**
52428 Jülich (DE)
- **Rieske, Ralf**
01129 Dresden (DE)

(30) Priorität: **13.12.2012 DE 102012112196**

(74) Vertreter: **Lippert, Stachow & Partner**
Patentanwälte
Krenkelstrasse 3
01309 Dresden (DE)

(71) Anmelder: **Technische Universität Dresden**
01069 Dresden (DE)

(72) Erfinder:
• **Ellinger, Frank**
01069 Dresden (DE)

(54) **Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Energiebedarfs und/oder einer Leistungsfähigkeit einer elektronischen Schaltung**

(57) Der Erfindung, welche ein Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Energiebedarfs und/oder einer Leistungsfähigkeit einer elektronischen Schaltung betrifft, liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren anzugeben, mit welchem der Energiebedarf von elektronischen Schaltungen, Komponenten und Systemen insbesondere der Kommunikationstechnik reduziert wird. Die-

se Aufgabe wird dadurch gelöst, eine Steuerung oder Regelung des Versorgungsstroms I_{SS} der elektronischen Schaltung mittels einer steuer- oder regelbaren Stromquelle und eine Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms I_{SS} bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials der Schaltung erfolgt.

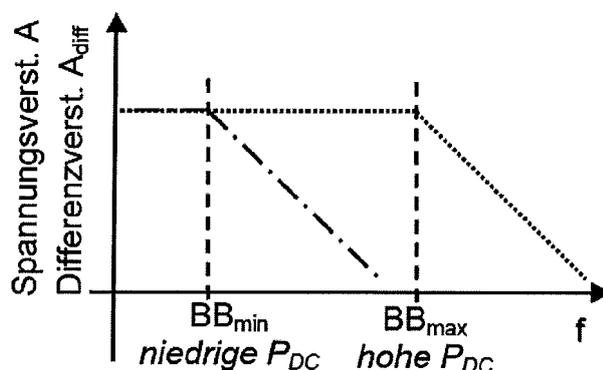


Fig. 1c

EP 2 762 989 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Energiebedarfs und/oder einer Leistungsfähigkeit einer elektronischen Schaltung, bei welchem in Abhängigkeit eines vorgegebenen Energiebedarfs oder einer vorgegebenen Leistungsfähigkeit die elektronische Schaltung gesteuert oder geregelt wird.

[0002] Diese Steuerung oder Regelung einer elektronischen Schaltung mittels eines aktuell vorgegebenen Energiebedarfs oder einer aktuell vorgegebenen bzw. notwendigen Leistungsfähigkeit wird nachfolgend als Energie- und Leistungsfähigkeitsadaptivität bezeichnet.

[0003] Als Energiebedarf einer elektronischen Schaltung wird der Bedarf oder Verbrauch an elektrischer Leistung P bzw. elektrischer Energie E bezeichnet.

[0004] Der Begriff Leistungsfähigkeit einer elektronischen Schaltung umfasst deren spezifische Kenngrößen bzw. Betriebseigenschaften wie beispielsweise die Parameter Datenübertragungsgeschwindigkeit, Bitfehler-rate, Bandbreite, Taktfrequenz, Verstärkung oder Rauschen.

[0005] Heutzutage ist der Energieverbrauch elektrischer Systeme enorm. Einen großen Teil nehmen dabei Kommunikationssysteme ein. Es werden enorme Mengen an Daten über sowohl kurze Strecken, beispielsweise zwischen Rechen- und Datenzentren oder in öffentlichen Einrichtungen als auch über längere oder lange Strecken, beispielsweise in sogenannte Weitverkehrsübertragungsnetze, durch drahtgebundene und drahtlose sowie elektrische und optische Kommunikationsverbindungen übertragen.

[0006] Der kontinuierlich steigende Bedarf an verfügbaren Bandbreiten in Übertragungssystemen, zu übertragenden Datenmengen und immer höhere Datenübertragungsgeschwindigkeiten bedingen einen stetigen Anstieg der Anzahl der Verbindungen und damit einen stetig steigenden Energiebedarf.

[0007] Damit wird für die Übertragung von Daten heutzutage bereits das 200-fache an Energie als für deren Verarbeitung benötigt, wie in DARPA/IPTO study, by Peter Kogge, et. Al.: <http://www.nd.edu/~kogge/reports.html>, Alan Benner (IBM), Key note at IEEE Winter Topical Meeting Mallorca (2010)] aufgezeigt wird.

[0008] Um beispielsweise in Kommunikationssystemen die bei einer Datenübertragung maximal auftretende Datenlast zu gewährleisten, werden die Datenverbindungen meistens bei ihrer maximalen Leistungsfähigkeit, d. h. mit der maximalen Datenrate bzw. Bandbreite sowie mit den maximalen Ausgangsleistungen oder Verstärkungen, betrieben. Damit verbrauchen die Systemkomponenten auch eine hohe Versorgungsleistung. In realen Netzen wird die maximale Bandbreite aber nur zu bestimmten Zeitpunkten bzw. für eine bestimmte Zeitdauer benötigt und variiert in der Regel. Im Tagesverlauf beispielsweise steigt die Datenlast am Morgen langsam an, erreicht am Nachmittag ihren Höhepunkt, fällt zum Abend wieder ab, bis es in der Nacht das Minimum er-

reicht.

[0009] Durch Anpassung der Leistungsfähigkeit der Übertragung an den aktuellen Datenratenbedarf kann der Energieverbrauch variiert und schließlich signifikant gesenkt werden, womit sich ebenfalls die damit verbundenen Kosten verringern lassen.

[0010] Die Implementierung einer Leistungsfähigkeits- und Energieadaptivität kann auf verschiedene Art und Weise realisiert werden. Die einfachste Variante ist das bedarfsmäßige Zu- und Abschalten von Komponenten bzw. kompletten parallelen Verbindungen.

[0011] Im Stand der Technik wird die Leistungsfähigkeits- und Energieadaptivität in der Kommunikationstechnik bisher überwiegend und sehr ausführlich im Mikroprozessorbereich sowie bei elektrischen Verbindungen untersucht und umgesetzt. Eine Verringerung des Energiebedarfs von Mikroprozessoren bei geringer werdenden Rechengeschwindigkeiten kann durch eine Skalierung deren Versorgungsspannung (Stichwort: Dynamic Voltage Scaling) erreicht werden. Beispiele hierfür sind aus Q. Wu, P. Juang, M. Martonosi, L.-S. Peh, D.W. Clark, "Formal control techniques for power-performance management," IEEE Micro., vol.25, no.5, pp. 52-62, 2005, T. D. Burd and R. W. Brodersen, "Design issues for dynamic voltage scaling," In Proceedings of the 2000 international symposium on Low power electronics and design (ISLPED '00). ACM, New York, NY, USA, 2000 oder Gang Qu, "What is the limit of energy saving by dynamic voltage scaling," International Conference on Computer Aided Design (ICCAD 2001), 2001 bekannt.

[0012] Aufgrund der begrenzten Ladekapazität von Batterien bzw. Akkumulatoren ist eine Energieadaptivität vor allem auch bei mobilen Anwendungen bekannt und von großer Bedeutung. Beispiele hierfür finden sich in F. Haßler, F. Ellinger and J. Carls, 'Analysis of buck-converters for efficiency enhancements in power amplifiers for wireless communication', SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007., pp. 616-620, 2007 oder R. Wolf, F. Ellinger and R. Eickhoff, 'On the Maximum Efficiency of Power Amplifiers in OFDM Broadcast Systems with Envelope Following', The 2nd International ICST Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (MobiLight), Barcelona, 2010.

[0013] Beispielsweise beim GSM Standard wird bei einem Verbindungsaufbau zunächst mit der höchsten Sendeleistung abgestrahlt und diese im Laufe der Verbindung entsprechend den Übertragungsbedingungen, wie Distanz zwischen Sender und Empfänger, Bitfehlerrate, Übertragungsdämpfung etc. und der Empfangsqualität angepasst und heruntergeregelt (3GPP TS 45.-series specifications). Diese geschieht in der Regel durch spannungsgesteuerte Leistungsverstärker mit variabler Verstärkung.

[0014] Für drahtgebundene elektrische Verbindungen existieren ebenfalls Lösungen zur Energieadaptivität. Durch die IEEE802.3az Energy-Efficient Ethernet Gruppe wurde beispielsweise ein Übertragungsprotokoll

eingeführt, mit welchem einzelne Verbindungen zeitweise in einen Leerlaufbetrieb mit verringerter Versorgungsleistung geschaltet werden können, wie in M. Bennett, "Energy Efficient Ethernet. Overview." ITU-T SG15. Geneva, Switzerland. February 15, 2008, Lawrence Berkeley National Laboratory, [http://www.itu.int/dms](http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/09/05/T0905000010005PDFE.pdf) pub/itu-t/oth/09/05/T0905000010005PDFE.pdf dargestellt ist.

[0015] Darüber hinaus ist für elektrische Verbindungen per Simulation die Anwendbarkeit von Dynamic Voltage Scaling gezeigt worden. Siehe Li Shang; Li-Shiuan Peh; Jha, N.K.; "Dynamic voltage scaling with links for power optimization of interconnection networks," High-Performance Computer Architecture, 2003. HPCA-9 2003. Proceedings. The Ninth International Symposium on , vol., no., pp. 91- 102, 8-12 Feb. 2003.

[0016] Bei elektrischen Verbindungen zwischen Prozessoren und Speicherbauelementen wurden bereits Möglichkeiten zum vollständigen Ein- und Ausschalten in B. Leibowitz et al. "A 4A 4.3 GB/s Mobile Memory Interface With Power-Efficient Bandwidth Scaling", IEEE Journal on Solid-State Circuits, vol. 45, no. 4, April 2010 und J. Zerbe et al., "A 5.6Gb/s 2.4mW/Gb/s Bidirectional Link With 8ns Power-On", in IEEE IVLSI Symposium, Kyoto, 2011 demonstriert.

[0017] Zur Adaptivität bei optischen Verbindungen gibt es zwar bereits einige Studien, zum einen ist eine solche Leistungsfähigkeits- und Energieadaptivität jedoch praktisch noch nicht im Einsatz und zum anderen unterscheiden sich diese Ansätze maßgeblich von dem hier beschriebenen Verfahren. Zum großen Teil existieren Systemansätze, um die Leistungsfähigkeit und den Energieverbrauch einer optischen Verbindung zu steuern, wie aus Kodi, A.K.; Louri, A., "Energy-Efficient and Bandwidth-Reconfigurable Photonic Networks for High-Performance Computing (HPC) Systems," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of , vol.17, no.2, pp.384-395, March-April 2011 und Avinash Karanth Kodi; Louri, A.; "Power-Aware Bandwidth-Reconfigurable Optical Interconnects for High-Performance Computing (HPC) Systems," Parallel and Distributed Processing Symposium, 2007. IPDPS 2007. IEEE International, vol., no., pp.1-10, 26-30 March 2007 bekannt ist.

[0018] Hierbei werden intelligente Algorithmen und Architekturen auf Systemebene vorgestellt, die zu einer Rekonfiguration und Anpassung von Bandbreite und Energieverbrauch für die individuellen Kanäle in einem optischen Netz führen. In F. Idzikowski et al. "Saving energy in IP-over-WDM networks by switching off line cards in low-demand scenarios," 14th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Feb. 2010 wird beispielsweise beschrieben, wie in Langstreckennetzen durch das Ein-/Ausschalten von Verbindungen und durch Umleitung der Daten über andere Verbindungen Energie gespart werden kann. Eine Umsetzung auf Komponenten- und Schaltungsebene wird dabei allerdings nicht betrachtet.

[0019] Auf Komponentenebene von optischen Über-

tragungssystemen gibt es nur wenige Arbeiten. In J. Hu, D. Qian, and T. Wang, "Energy Efficient OFDM Transceiver based on Traffic Tracking and Adaptive Bandwidth Adjustment," in 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper We.10.P1.53 werden Strategien zur Energieeinsparung im Digitalteil eines OFDM-basierten optischen Transceivers vorgestellt. Dabei wird lediglich die Bandbreite des OFDM Signals und damit die Abtastrate für den Digitalteil eingestellt, die Betriebsparameter der analogen Schaltungsteile bleiben jedoch unverändert.

[0020] Es gibt zwar weitere Arbeiten und Patente, welche auf die Adaptivität von optischen Verbindungen abzielen, allerdings dienen diese nicht der Senkung des Energieverbrauchs, sondern vielmehr der Optimierung hinsichtlich der Übertragungseigenschaften. Ausführungen hierzu bezüglich des Parameters Bitfehlerrate sind aus Chih-Kang Chien; Hsieh-Hung Hsieh; Huan-Sheng Chen; Liang-Hung Lu, "A Transimpedance Amplifier With a Tunable Bandwidth in 0.18-CMOS," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on , vol.58, no.3, pp.498-505, March 2010 und Huei-Yan Hwang; Jun-Chau Chien; Tai-Yuan Chen; Liang-Hung Lu, "A CMOS Tunable Transimpedance Amplifier," Microwave and Wireless Components Letters, IEEE , vol.16, no.12, pp.693-695, Dec. 2006 bekannt. Bezüglich des Parameters "Signalintegrität" ist die G. Giaretta (Finisar), "Dynamically adaptive optical transceiver," US patent 7684710, 2010 und bezüglich der "Flexibilität" also unterschiedlicher Datenraten einer Verbindung die Ewen et al. (IBM), "Switchable-bandwidth optical receiver," US patent 6862322, 2005 und die Killmeyer et al. (Vitesse Semiconductor Corporation) "Variable bandwidth transimpedance amplifier with one-wire interface," US patent 7,657,191, 2010 aus dem Stand der Technik bekannt.

[0021] Lediglich in X. Chen and L.-Shiuan. Peh, "Exploring the design space of power-aware opto-electronic network systems," In Proc. Of the 11th International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA-11), pp. 120-131, 2005 und Xuning Chen; Gu-Yeon Wei; Li-Shiuan Peh; "Design of low-power short-distance opto-electronic transceiver front-ends with scalable supply voltages and frequencies," ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design pp. 277-282, Aug. 2008 wird das Entwicklungspotential von energie- und frequenzadaptiven Transceiverkomponenten zur optischen Datenübertragung mittels einer Steuerung der Versorgungsspannung untersucht und umgesetzt.

[0022] Aus der US 2009/0039847 A1 sind eine Anordnung und ein Verfahren zur Regelung einer Ausgangsspannung in einem linearen Spannungsregler bekannt. Dieser stelle eine konstante Ausgangsspannung zur Verfügung, die unabhängig von Schwankungen der Eingangsspannung oder dem Laststrom ist. Somit lässt sich beispielsweise eine Versorgungsspannung, wie in Netzteilen, stabilisieren. Die Ausgangsspannung des Span-

nungsreglers kann in einem bestimmten Bereich linear eingestellt werden. Durch eine Regelschleife wird die Ausgangsspannung konstant gehalten. Dazu wird ein Shunt-Regler (entspricht einer "programmierbaren" Referenzspannungsquelle) verwendet. Bei Abweichungen von Referenzspannungswert wird der Strom durch den Shunt-Regler verändert und damit die Ausgangsspannung nachgeregelt bzw. stabilisiert. Derart wird indirekt durch einen regelbaren Strom ein konstantes Ausgangspotenzial erreicht.

[0023] Aus der DE 69112890 T2 ist eine ELC-Ausgangspufferschaltung zur Erzeugung eines vorbestimmten Ausgangsspannungshubs bekannt, welche robust gegen Schwankungen in der Stromversorgung und der Temperatur arbeiten soll. Bei dieser ECL (emitter coupled logic) Ausgangspufferschaltung handelt es sich um eine Schaltung, die einen stabilen vorbestimmten Ausgangsspannungshub (z. B. den eines logischen High-Spannungspegels) liefert, der unabhängig von Temperatur-, Stromversorgungs- oder Prozessschwankungen ist. Im vorliegenden Fall wird eine Ausgleichsschaltung verwendet, die bei Abweichungen der Ausgangsspannung (z.B. durch Temperaturschwankungen usw.) einen Kompensationsstrom generiert und somit die Ausgangsspannung stabilisiert.

[0024] Bei den Schaltungen der beiden zitierten Druckschriften handelt es sich zwar um Schaltungen, bei denen Ströme und Spannungen geregelt/gesteuert werden, allerdings zur Stabilisierung/Kompensation von Änderungen durch äußere Einflüsse.

[0025] Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die aus dem Stand der Technik bekannten, oben beschriebenen Methoden zur Adaptivität in Kommunikationssystemen entweder nur auf Systemebene implementiert worden sind oder andere Ziele als die Senkung des Energieverbrauchs verfolgen, wie beispielsweise die Optimierung von Übertragungseigenschaften oder eine höhere Flexibilität in der Anwendung.

[0026] Leistungsfähigkeits- und Energieadaptivität auf Komponentenebene zur Verringerung des Energieverbrauchs wurde bisher nur rudimentär und bei elektrischen Verbindungen implementiert. Energieadaptivität bei optischen Verbindungen wurde bisher nur auf Systemebene untersucht. Es existieren aber noch keine praktischen Realisierungen, weder auf System- noch auf Komponentenebene.

[0027] Weiterhin wurde die Anpassung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten dabei ausschließlich über eine Variation der Versorgungsspannung realisiert.

[0028] Der Nachteil dieser Realisierung besteht zum einen darin, dass eine Spannungseinstellung einen geringen Regelbereich besitzt und dass damit ein nur geringer Effekt bei der Einsparung an Versorgungsleistung bewirkt wird.

[0029] Zum anderen ist die Realisierung einer Spannungssteuerung aufwendig. In der Regel werden dazu DC/DC Konverter verwendet, welche eine niedrige Effi-

zienz besitzen und daher einen geringen Beitrag zur Energieeinsparung leisten.

[0030] Des Weiteren wurden bisher keine Verfahren vorgestellt, wie eine mit der Veränderung der Versorgungsspannung einhergehende Änderung der Verstärkung der Schaltungen kompensiert werden kann. Dies ist ein wesentlicher Nachteil aller bisherigen Methoden zur Adaptivität, da die meisten Anwendungen konstante Potentiale unabhängig von variablen Versorgungsspannungen und -strömen benötigen.

[0031] Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur adaptiven Energie- und Leistungs-fähigkeitssteuerung von elektronischen Schaltungen anzugeben, mit welchem der Energiebedarf von elektronischen Schaltungen, Komponenten und Systemen insbesondere der Kommunikationstechnik reduziert wird.

[0032] Gemäß der Erfindung wird die Aufgabe bei einem Verfahren zur adaptiven Energie- und Leistungsfähigkeitssteuerung der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass eine Steuerung oder Regelung des Versorgungsstroms I_{SS} der elektronischen Schaltung zur Regelung eines Energiebedarfs und/oder einer Leistungsfähigkeit der elektronischen Schaltung in Abhängigkeit einer vorgegebenen Datenübertragungsrate der elektronischen Schaltung mittels einer steuer- oder regelbaren Stromquelle erfolgt und dass eine Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms I_{SS} bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials der Schaltung unter Verwendung einer abgespeicherten Tabelle erfolgt, wobei in dieser Tabelle zu verschiedenen Anforderungen an eine Datenübertragungsrate jeweils zugeordnete Werte für den Versorgungsstrom I_{SS} und Werte zur Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands hinterlegt sind.

[0033] Allgemein erfolgt eine Einstellung eines variablen Versorgungsstroms I_{SS} der elektronischen Schaltung, wobei gleichzeitig eine Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms I_{SS} bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials der Schaltung vorgenommen wird.

[0034] In der Erfindung ist vorgesehen, dass für die Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands eine abgespeicherte Tabelle verwendet wird, wobei in dieser Tabelle zu verschiedenen Anforderungen an eine Datenübertragungsrate jeweils zugeordnete Werte für den Versorgungsstrom I_{SS} und Werte zur Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands hinterlegt sind.

[0035] Die zur Anpassung des Last- oder Rückkoppelwiderstands notwendigen Steuersignale können mittels einer gespeicherten Werte-Tabelle erzeugt werden. Hierfür sind in der Tabelle beispielsweise zu verschiedenen Datenübertragungsraten jeweils Werte für den zugehörigen Strom I_{SS} und Werte zur Erzeugung des Steuersignals für das Widerstandsnetzwerk hinterlegt.

[0036] Die vorliegende Beschreibung stellt somit Methoden vor, welche darauf abzielen, den Energiebedarf

durch die Implementierung von Adaptivität auf Komponenten-, Schaltungs- und Transistorebene in elektronischen Systemen allgemein, insbesondere in Kommunikationssystemen, drastisch zu verringern. Dabei wird die Leistungsfähigkeit eines elektronischen Systems kontinuierlich an deren tatsächlichen aktuellen Leistungsfähigkeits- oder Energiebedarf angepasst und somit auch ein bedarfsgerechter Energieverbrauch der Systeme erzielt.

[0037] Eine Steuerung des Versorgungsstromes besitzt, gegenüber der im Stand der Technik üblichen Steuerung der Versorgungsspannung, einen großen Regelbereich und kann einfach über variable Stromquellen, wie sie bereits in den meisten differentiellen Schaltungen verwendet werden, realisiert werden.

[0038] In diesem Patent wird ein Verfahren vorgestellt, wie der Arbeitspunkt der Schaltungen durch den Versorgungsstrom I_{SS} adaptiv angepasst und die Verstärkung A bzw. das Ausgangspotenzial der Schaltungen gleichzeitig konstant gehalten werden können.

[0039] Ist beispielsweise die Datenrate eines Kommunikationssystems, wie beispielsweise einem optisch oder elektrisch arbeitenden Datenübertragungssystem, gering, wird nur eine geringe Systembandbreite BB benötigt. Hierzu kann der Versorgungsstrom I_{SS} entsprechend dem vorgeschlagenen Verfahren heruntergeregelt werden. Damit verringert sich gleichzeitig der Energieverbrauch der Schaltung. Ein steuerbarer Versorgungsstrom I_{SS} kann beispielsweise durch variable steuerbare Stromquellen realisiert werden.

[0040] Mit Verringerung des Stromes I_{SS} kann es unter Umständen zu Veränderungen der Verstärkungscharakteristik der Schaltungsanordnung kommen, beispielsweise zu einer Verringerung der Verstärkung A bei Verringerung des Stromes I_{SS} .

[0041] Für die meisten Schaltungen wie beispielsweise Laserdiodentreiber werden aber konstante Ausgangspotenziale bei verschiedenen Versorgungsströmen benötigt. Eine Änderung des Ausgangspotenzials kann durch steuerbare variable Widerstände kompensiert werden. Diese neuen Konzepte sind universell bzw. ähnlich bei allen integrierten Schaltungen eines elektronischen Systems insbesondere bei Übertragungssystemen und in allen Halbleitertechnologien anwendbar, was insgesamt zu einer Energieadaptivität bzw. zu einer signifikanten Verringerung des Energiebedarfs der Einzelkomponenten und des gesamten Systems führt. Anwendbare Komponenten der Kommunikationstechnik sind beispielsweise Multiplexer/Demultiplexer, Frequenzteiler, Oszillatoren, Retimer-Schaltungen, Lasertreiber, Clock- and Data-Recovery, Spannungs-, Leistungs-, Begrenzungs- und Transimpedanzverstärker, digitale Schaltungen wie beispielsweise Latches oder Logikgatter und andere.

[0042] In einer ersten Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials mittels steuer- oder regel-

barer Widerstände erfolgt.

[0043] Allgemein kann ein ohmscher Widerstand oder ein als Widerstand wirkender veränderlicher Halbleiter genutzt werden, um die Verschiebung der Ausgangsspannung zu kompensieren. Dabei ist es möglich, dass der Widerstand oder Halbleiter mittels einer übergeordneten Steuerung gesteuert wird. Ebenso kann der Widerstand oder Halbleiter teil eines Regelkreises sein und geregelt werden.

[0044] In einer Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials mittels steuerbarer Rückkoppelwiderstände innerhalb der elektronischen Schaltung erfolgt.

[0045] Durch eine Veränderung des Stromes I_{SS} kann es zu einer unerwünschten Verschiebung des Ausgangspotenzials der gesteuerten Schaltung kommen. Erfindungsgemäß wird diese Ausgangspotenzialverschiebung durch eine geeignete Veränderung der Werte der in der Schaltung angeordneten Rückkoppelwiderstände erreicht.

[0046] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials mittels einer Anpassung des Lastwiderstands der elektronischen Schaltung erfolgt.

[0047] Eine andere Variation der Kompensation einer Ausgangspotenzialverschiebung besteht darin, den Lastwiderstand der Schaltung anzupassen, sodass die Verschiebung kompensiert wird.

[0048] In einer besonderen Ausführung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands mittels verschiedener zu- und abschaltbarer Zweige eines Widerstandsnetzwerkes erfolgt.

[0049] Zur Anpassung des Last- oder Rückkoppelwiderstands können steuerbare Widerstandsnetzwerke eingesetzt werden. Die Zu- und Abschaltung der Zweige dieses Widerstandsnetzwerkes kann durch Steuersignale einer übergeordneten zentralen Steuerinstanz erfolgen. Alternativ können zur Widerstandsveränderung auch Feldeffekttransistoren oder aktive induktive Lasten eingesetzt werden.

[0050] In einer Realisierungsvariante der Erfindung ist vorgesehen, dass die Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands mittels einer Regelung erfolgt, welche die Verschiebung des Ausgangspotenzials der Schaltung erfasst und mit einem vorgegebenen Toleranzbereich vergleicht und derart ein Steuersignal zur Anpassung erzeugt.

[0051] Alternativ zur vorgegebenen Werte-Tabelle kann auch eine Anpassung unter Nutzung eines Regelkreises erfolgen. Dieser überwacht beispielsweise das Ausgangspotenzial der Schaltung mit einem vorgegebenen Toleranzbereich. Bei Abweichungen außerhalb dieser Toleranz wird dann durch die Regelung ein Steuer-

signal für das Widerstandsnetzwerk zu Kompensation der Abweichung erzeugt. Prinzipiell können an der Stelle des Widerstandsnetzwerks auch ein regelbarer Transistor oder andere aktive Lasten zum Einsatz kommen.

[0052] Die Erfindung soll nachfolgend anhand einiger Ausführungsbeispiele näher erläutert werden. In den zugehörigen Zeichnungen zeigt

Fig. 1a eine erfindungsgemäße adaptive Steuerung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs am Beispiel eines Single-Ended-Verstärkers,

Fig. 1b eine erfindungsgemäße adaptive Steuerung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs am Beispiel eines Differenzverstärkers,

Fig. 1c eine grafische Darstellung des zur Fig. 1a und 1b gehörigem Verlauf der Spannungsverstärkung A und der Differenzverstärkung A_{diff} in Abhängigkeit der Frequenz f ,

Fig. 2 eine erfindungsgemäße adaptive Steuerung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs am Beispiel eines Laserdiodentreibers,

Fig. 3a eine erfindungsgemäße adaptive Steuerung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs am Beispiel eines Transimpedanzverstärkers mit paralleler Rückkopplung,

Fig. 3b eine zur Schaltung in Fig. 3a gehörige grafische Darstellung der Transimpedanzverstärkung r_T in Abhängigkeit der Frequenz f ,

Fig. 4a eine erfindungsgemäße adaptive Steuerung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs am Beispiel eines Spannungs- und Begrenzungsverstärkers mit Serienrückkopplung,

Fig. 4b eine zur Schaltung in Fig. 4a gehörige grafische Darstellung der Spannungsverstärkung A in Abhängigkeit der Frequenz f und

Fig. 5 eine erfindungsgemäße adaptive Steuerung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs am Beispiel eines Oszillators mit mehreren Phasen für Sub-Datenraten; $f_{\text{ck}} = \text{Datenrate}/3$.

[0053] Vorgeschlagen wird eine dynamische Anpassung der Leistungsfähigkeit und des Energiebedarfs einer elektronischen Schaltung. Hierbei wird in dieser Beschreibung als Leistungsfähigkeit der Schaltung beispielsweise die Bandbreite, die Taktfrequenz, die Verstärkung, eine Bitfehlerrate oder das Ausgangspotenzial der Schaltung verstanden. Der Energiebedarf umfasst

den Bedarf bzw. Verbrauch elektrischer Leistung bzw. Energie.

[0054] Hierzu werden Methoden vorgestellt, wie eine Adaptivität auf Schaltungs- bzw. Komponentenebene erreicht werden kann. Diese adaptive Steuerung umfasst im Wesentlichen die variable Einstellung verschiedener Leistungsfähigkeits-Arbeitspunkte über die Regelung von Versorgungsströmen sowie Widerständen und kann für alle elektrischen Komponenten beispielsweise eines Übertragungssystems unabhängig von der gegebenen Halbleitertechnologie (z.B. CMOS, SiGe BiCMOS usw.) verwendet werden, z.B. für Multiplexer/Demultiplexer, Frequenzteiler, Oszillatoren, Retimer-Schaltungen, Lasertreiber, Clock- and Data-Recovery, Spannungs-, Leistungs-, Begrenzungs- und Transimpedanzverstärker, digitale Schaltungen wie z.B. Latches oder Logikgatter usw.

[0055] Hierzu wird Adaptivität auf Komponenten- bzw. Schaltungsebene implementiert, welche eine Anpassung der Leistungsfähigkeit und damit des Energieverbrauchs an die aktuelle Datenlast ermöglicht. Die Realisierung dieser Adaptivität erfolgt über eine Variation der Arbeitspunkte jeder einzelnen Schaltung durch eine dynamische Steuerung von Versorgungsströmen und Widerständen.

[0056] Im Folgenden wird die erfindungsgemäße adaptive Anpassung von Leistungsfähigkeit- und Energieverbrauch der Komponenten auf Schaltungs- und Transistorebene, zunächst anhand grundlegender Verstärkerschaltungen und darauf folgend anhand verschiedener praktischer Beispiele näher erläutert.

[0057] Dabei stellen die Beispiele nur eine Auswahl an Schaltungen dar, bei denen das vorgestellte Verfahren einsetzbar ist. Grundsätzlich ist diese Art von Adaptivität zur Senkung des Energieverbrauchs bei allen notwendigen elektronischen Komponenten insbesondere für die Kommunikationstechnik ähnlich und implementierbar.

[0058] In dieser Beschreibung werden die nachfolgend aufgeführten Abkürzungen verwendet.

I_{SS}	Versorgungsstrom
V_{DD}	Versorgungsspannung
P_{DC}	Leistungsverbrauch
g_m	Transkonduktanz
R_i	Eingangsimpedanz
C_D	Diodenkapazität
f_t	Transitfrequenz
BB	Bandbreite
R_D	Lastwiderstand
R_F	Rückkoppelwiderstand
A	Spannungsverstärkung
A_{diff}	Differenzverstärkung
r_T	Transimpedanzverstärkung
V_{in}	Eingangsspannung
V_{out}	Ausgangsspannung
I_{in}	Eingangsstrom
I_{out}	Ausgangsstrom
R_s	Quellenimpedanz

C_s Quellenkapazität

[0059] In der Fig. 1a ist eine Realisierung des Verfahrens mit einer Single-Ended-Verstärkeranordnung dargestellt. Die Fig. 1b zeigt eine Variante mit einem Differenzverstärker.

[0060] Da in diesem und den nachfolgenden Beispielen zur Erläuterung des Verfahrens nur elektronische Grundsaltungen gezeigt werden, wird auf eine detaillierte Beschreibung der Schaltungsanordnungen verzichtet und nur die für das Verfahren bedeutsamen Teile der Schaltungen in die Beschreibung des Verfahrensablaufs einbezogen.

[0061] Von einer der erläuterten Schaltungsanordnungen übergeordneten zentralen Steuerinstanz wird der aktuelle Energiebedarf oder die Leistungsfähigkeit der Verstärkeranordnung bezüglich der notwendigen Datenrate vorgegeben.

[0062] Für den Fall, dass eine niedrige Datenrate ausreichend ist, kann die Bandbreite BB der Schaltungen verringert werden. Sowohl beim Single-Ended-Verstärker in der Fig. 1a als auch beim Differenzverstärker in der Fig. 1b erfolgt dies durch eine Reduzierung des Versorgungstromes I_{SS} über variable Stromquellen. Dadurch sinkt der Leistungsverbrauch des Verstärkers P_{DC} drastisch ab.

[0063] Durch die Verringerung des Stromes I_{SS} wird die Transkonduktanz g_m, welche sich proportional zur Bandbreite BB verhält, abgesenkt. Als positiver Seiteneffekt wird proportional auch das Rauschen verringert. Jedoch fällt gleichzeitig auch die Spannungs- ($|A| \approx g_m R_D$) bzw. Differenzverstärkung ($|A_{diff}| \approx g_m R_D / 2$) mit sinkendem g_m ab. Dies kann durch die Erhöhung der Lastwiderstände R_D wieder entsprechend kompensiert werden, was ein konstantes Ausgangspotenzial der Schaltungen bei gleichbleibender Spannungsverstärkung A bewirkt. Die Erhöhung der Lastwiderstände R_D erzeugt wiederum den positiven Nebeneffekt, dass sich die Bandbreite BB weiter verringert.

[0064] Für den Fall, dass eine hohe Datenrate gefordert wird, wird durch eine Erhöhung des Stromes die Bandbreite BB wieder vergrößert. Die Vergrößerung von I_{SS} bewirkt eine Vergrößerung der Transkonduktanz g_m, welche sich proportional zur Bandbreite BB verhält. Mit steigendem g_m vergrößert sich die Spannungs- ($|A| \approx g_m R_D$) bzw. Differenzverstärkung ($|A_{diff}| \approx g_m R_D / 2$). In diesem Fall kann eine bei einer geringeren Datenrate vorgenommene Anpassung der Lastwiderstände R_D wieder entsprechend zurückgenommen werden, sodass sich der reguläre Wert für R_D einstellt. Auch in diesem Fall bleibt die Spannungsverstärkung A konstant.

[0065] Die in den Figuren 1a und 1b dargestellten variablen Widerstände R_D, welche regelbar oder auch steuerbar sind, können beispielsweise mittels eines schaltbaren Widerstandsnetzwerks (Array) realisiert werden. Die Steuersignale zum Zu- und Abschalten der Zweige des Widerstandsnetzwerks können durch die übergeordnete zentrale Instanz oder Regeleinheit erzeugt werden.

So können beispielsweise in Form einer Tabelle zugehörige Werte für den Strom I_{SS} zu verschiedenen Datenraten sowie entsprechende Steuersignalwerte hinterlegt werden.

[0066] Alternativ kann eine Regelung derart erfolgen, dass eine Erfassung des Ausgangspotenzials der Schaltung erfolgt und dass bei einer Abweichung dieses Ausgangspotenzials von einem vorgegebenen Wert eine Regelung mittels Zu- oder Abschalten der Zweige des Widerstandsnetzwerks erfolgt, bis der vorgegebene Wert wieder erreicht ist.

[0067] In der Fig. 1c sind die zu den Schaltungsanordnungen aus Fig. 1a und Fig. 1b zugehörigen Verstärkungs-Frequenz-Verläufe gezeigt. Dabei ist für den Single-Ended-Verstärker die Spannungsverstärkung A und für den Differenzverstärker die Differenzverstärkung A_{diff} auf der Ordinate des Koordinatensystems und auf der Abszisse die Frequenz f dargestellt. Die Punkt-Punkt-Linie kennzeichnet den Verlauf für den Fall einer hohen geforderten Datenübertragungsrate, bei welchem eine große Bandbreite BB bereitgestellt wird und bei welchem der Leistungsverbrauch P_{DC} hoch ist. Der Fall einer nur geringen Datenübertragungsrate stellt die Strich-Punkt-Linie dar, welcher durch eine geringe Bandbreite BB und einen geringen Leistungsverbrauch P_{DC} gekennzeichnet ist. Der Verstärkungsverlauf kann auch jeden beliebigen Verlauf zwischen diesen beiden Grenzwerten BB_{min} und BB_{max} annehmen.

[0068] In der Fig. 2 ist eine Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens am Beispiel eines Laserdiodentreibers gezeigt, wie er üblicherweise im Bereich der Kommunikationstechnik eingesetzt wird.

[0069] Bei diesem Laserdiodentreiber handelt es sich im Wesentlichen um die bereits oben beschriebenen allgemeinen Verstärkerstufen. Analog dazu erfolgt auch die adaptive Steuerung.

[0070] Der Betrieb dieses Treibers für den Fall eines hohen Leistungsbedarfs, also einer hohen benötigten Datenrate, erfolgt wie in dieser Grundsaltung üblich mit dem maximalen Strom I_{SS} und somit der maximalen Bandbreite BB und dem maximalen Leistungsverbrauch P_{DC} wie bereits zur Fig. 1a und 1b ausgeführt.

[0071] Für den Fall, dass eine niedrige Datenrate ausreichend ist, kann auch hier die Bandbreite BB des Laserdiodentreibers verringert werden. Durch eine Reduzierung des Versorgungstromes I_{SS} über die dargestellte variable Stromquelle erfolgt ein Absenken des Leistungsverbrauchs P_{DC} des Laserdiodentreibers.

[0072] Durch die Verringerung des Stromes I_{SS} wird die Transkonduktanz g_m, welche sich proportional zur Bandbreite BB verhält, abgesenkt. Als positiver Seiteneffekt wird proportional auch das Rauschen verringert. Jedoch fällt gleichzeitig auch die Spannungs- ($|A| \approx g_m R_D$) bzw. Differenzverstärkung ($|A_{diff}| \approx g_m R_D / 2$) mit sinkendem g_m ab. Dies kann durch die Erhöhung der Lastwiderstände R_D wieder entsprechend kompensiert werden, was ein konstantes Ausgangspotenzial der Schaltungen bei gleichbleibender Spannungsverstärkung A bewirkt.

Die Erhöhung der Lastwiderstände R_D erzeugt wiederum den positiven Nebeneffekt, dass sich die Bandbreite BB weiter verringert.

[0073] In der Fig. 3a ist eine Schaltungsanordnung eines Transimpedanzverstärkers gezeigt, bei welcher das erfindungsgemäße Verfahren zur adaptiven Leistungssteuerung zu Anwendung kommt.

[0074] Auch bei dieser Schaltung kann der Versorgungsstrom I_{SS} verringert werden, wenn niedrige Datenraten bei der Datenübertragung ausreichend sind. Mit der Verringerung des Stroms I_{SS} verringert sich gleichzeitig die Bandbreite BB , welche durch die Beziehung $1/(Verstärkereingangsimpedanz R_i \cdot Photodiodenkapazität C_D)$ gegeben ist.

[0075] Die Eingangsimpedanz $R_i \approx R_F/(1+g_m R_D)$ wiederum hängt maßgeblich von der Transkonduktanz g_m ab, welche ebenfalls mit sinkendem Strom I_{SS} abfällt. Als positiver Seiteneffekt wird auch das Rauschen verringert, welches sich proportional zu g_m und zur Bandbreite verhält. Durch die Verringerung des Versorgungsstromes I_{SS} sinkt der Leistungsverbrauch P_{DC} des Transimpedanzverstärkers drastisch ab.

[0076] Falls es durch die Veränderung des Arbeitspunktes zu einer Verringerung der effektiven Transimpedanzverstärkung $r_T = R_F$ kommt, kann dies durch eine Vergrößerung des Rückkoppelwiderstandes R_F kompensiert werden. Der Rückkoppelwiderstand R_F kann beispielsweise mittels eines schaltbaren Widerstandnetzwerkes, steuerbaren passiven resistiven Feldeffekttransistors oder mittels einer aktiven induktiven Last variabel realisiert werden.

[0077] Die Fig. 3b zeigt die zur Transimpedanzverstärkeranordnung aus Fig. 3a zugehörigen Verstärkungsfrequenz-Verläufe.

[0078] Die Punkt-Punkt-Linie stellt den Verstärkungsverlauf bei einem maximalen Versorgungsstromes I_{SS} also bei maximaler Datenübertragungsrate dar. Die Strich-Punkt-Linie den Verstärkungsverlauf bei einem minimalen Versorgungsstromes I_{SS} also bei minimaler Datenübertragungsrate. Der Verstärkungsverlauf kann auch jeden beliebigen Verlauf zwischen den beiden Grenzwerten BB_{min} und BB_{max} annehmen.

[0079] In der Fig. 4a ist die Umsetzung des Verfahrens an einem Spannungs- und Begrenzungsverstärker mit serieller Rückkopplung gezeigt. Die Figur 4b zeigt den zur Anordnung in Fig. 4a zugehörigen Verlauf der Spannungsverstärkung A in Abhängigkeit der Frequenz f in der bereits zur Fig. 1c beschriebenen Weise dar.

[0080] Analog zum Transimpedanzverstärker in der Fig. 3a wird durch die Verringerung des Versorgungsstroms I_{SS} , die Transkonduktanz g_m , die Bandbreite $BB \sim 1+g_m R_S/2$ und schließlich der Energieverbrauch P_{DC} der Schaltung reduziert. Aufgrund der Gegenkopplung verändert sich die Spannungsverstärkung A nicht, solange $g_m R_S/2 \gg 1$ gilt. Bei Bedarf kann die Spannungsverstärkung und andere Schaltungsparameter zusätzlich durch die Steuerung von R_S oder R_D eingestellt werden.

[0081] In der Fig. 5 wird eine Umsetzung des Verfah-

rens an einem Oszillator dargestellt. Dieser Oszillator weist mehrere Phasen für Sub-Datenraten auf, wobei gilt $f_{ck} = \text{Datenrate}/3$. Oszillatoren sind ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil in Schaltungen und Systemen zur Datenübertragung. Sie werden vor allem bei der Ansteuerung von Multiplexern/Demultiplexern und in Takt- und Datenrückgewinnungsschaltungen verwendet. Dieses Schaltungsbeispiel entspricht einem mehrstufigen Differenzverstärker, wie oben beschrieben wurde.

[0082] Sinkt die Datenlast einer Kommunikationsverbindung ab und wird daraufhin die Bandbreite BB des Systems wie oben beschrieben verringert, um Energie zu sparen. In diesem Fall ist dann auch eine Reduktion der Taktfrequenzen f_{ck} , welche durch den Oszillator erzeugt werden, möglich. Dies geschieht ebenfalls analog zu den bereits beschriebenen Verfahren.

[0083] So kann der Oszillator beispielsweise mit einer maximalen Frequenz von 18,7 GHz bei maximaler Datenübertragungsrate betrieben werden. Durch eine Verringerung eines Versorgungsstroms I_{SS} kann diese Frequenz bis auf einen Minimalwert von beispielsweise 2,7 GHz abgesenkt werden.

[0084] Der sinkende Strom I_{SS} bewirkt wieder eine Verringerung der Transkonduktanz g_m . Mittels einer Vergrößerung des Lastwiderstände R_D wird die Spannungsverstärkung A der Anordnung konstant gehalten, da $A \sim g_m R_D$ & V_{out} ist und die Beziehung $f_{ck} \sim 1/(R_D C)$ gilt.

[0085] Zusätzlich zur verfahrensgemäßen Regelung des Stroms I_{SS} kann eine weitere adaptive Arbeitspunktanpassung auch durch eine zusätzliche Steuerung der Versorgungsspannungen V_{DD} erreicht werden, wie sie in einigen Systemen bereits zur Anwendung kommt.

[0086] Eine adaptive Steuerung der einzelnen Komponenten ermöglicht generell die Anpassung ihrer Leistungsfähigkeit an den aktuellen, tatsächlichen Leistungsbedarfs. Dadurch wird eine Senkung bzw. Dynamisierung des Energieverbrauchs beim Betrieb des elektronischen Systems insbesondere des Kommunikationssystems erreicht, was in Anbetracht des stetig steigenden Bandbreitenbedarfs und der stetig steigenden Anzahl von Verbindungen eine immer größere Bedeutung gewinnt. Mit einer verringerten Systemperformanz wird gleichzeitig weniger Verlustwärme erzeugt. Dadurch müssen die Systeme weniger gekühlt werden, was wiederum zu einer weiteren Senkung des Energieverbrauchs führt. Damit leistet die Erfindung einerseits einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung der CO_2 -Emission durch elektronische Systeme und Komponenten insbesondere durch Nachrichtenübertragungssysteme. Zum anderen besitzt die Erfindung ein enormes Potential zur Einsparung von Energie- bzw. Betriebskosten (in der Größenordnung von Milliarden € innerhalb Europas) für solche Systeme.

[0087] Bei der Anwendung der Methoden in der Kommunikationstechnik wird durch die Reduzierung des Versorgungsstromes und die damit verbundene verringerte Bandbreite außerdem ein viel geringeres Rauschen der Schaltungen erzielt. Zusätzlich können durch eine adap-

tive Widerstandssteuerung die Schaltungsparameter auch hinsichtlich der Übertragungseigenschaften wie beispielsweise der Bitfehlerrate der Verbindungen optimiert werden.

[0088] Ein weiterer großer Vorteil der Erfindung ist, dass die vorgestellten Verfahren für jegliche elektronische Systeme insbesondere zur Datenübertragung verwendet werden können.

[0089] So ist die Erfindung innerhalb der Kommunikationstechnik beispielsweise sowohl in Weitverkehrs-Telekommunikationsnetzen als auch bei kurzen Verbindungen in Daten- und Rechenzentren sowie Hochleistungsrechner-Systemen einsetzbar.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Energiebedarfs und/oder einer Leistungsfähigkeit einer elektronischen Schaltung, bei welchem in Abhängigkeit eines vorgegebenen Energiebedarfs oder einer vorgegebenen Leistungsfähigkeit die elektronische Schaltung gesteuert oder geregelt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Steuerung oder Regelung des Versorgungsstroms I_{SS} der elektronischen Schaltung zur Regelung eines Energiebedarfs und/oder einer Leistungsfähigkeit der elektronischen Schaltung in Abhängigkeit einer vorgegebenen Datenübertragungsrate der elektronischen Schaltung mittels einer steuer- oder regelbaren Stromquelle erfolgt und dass eine Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms I_{SS} bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials der Schaltung unter Verwendung einer abgespeicherten Tabelle erfolgt, wobei in dieser Tabelle zu verschiedenen Anforderungen an eine Datenübertragungsrate jeweils zugeordnete Werte für den Versorgungsstrom I_{SS} und Werte zur Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands hinterlegt sind. 20
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials mittels steuer- oder regelbarer Widerstände erfolgt. 25
3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials mittels steuer- oder regelbarer Rückkoppelwiderstände innerhalb der elektronischen Schaltung erfolgt. 30
4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Kompensation einer durch eine Änderung des Versorgungsstroms bedingten Verschiebung des Ausgangspotenzials mittels einer An- 35

passung des Lastwiderstands der elektronischen Schaltung erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands mittels verschiedener zu- und abschaltbarer Zweige eines Widerstandsnetzwerkes erfolgt. 5
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Anpassung des Lastwiderstands und/oder des Rückkoppelwiderstands mittels einer Regelung erfolgt, welche die Verschiebung des Ausgangspotenzials der Schaltung erfasst und mit einem vorgegebenen Toleranzbereich vergleicht. 10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

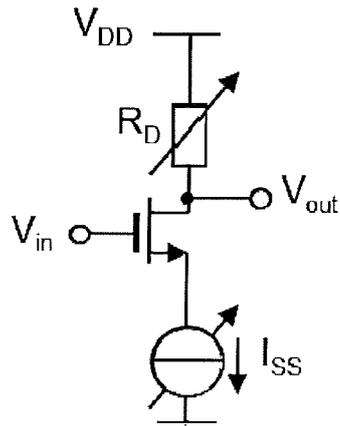


Fig. 1a

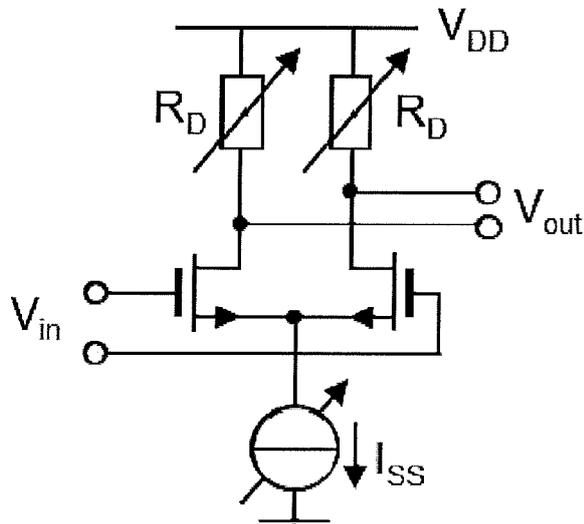


Fig. 1b

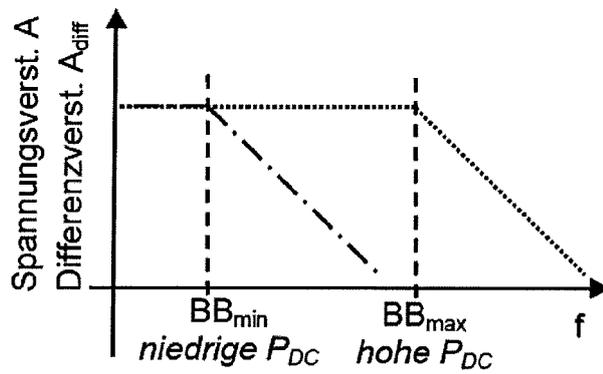


Fig. 1c

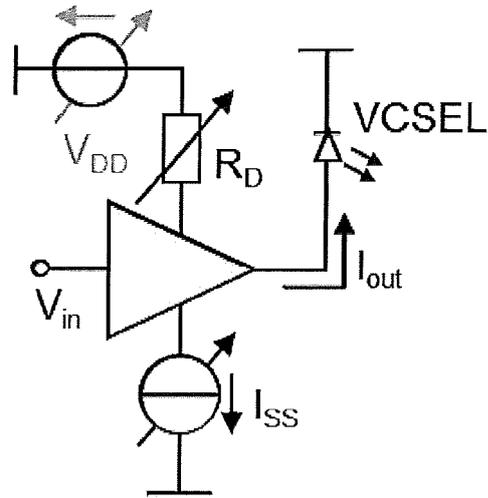


Fig. 2

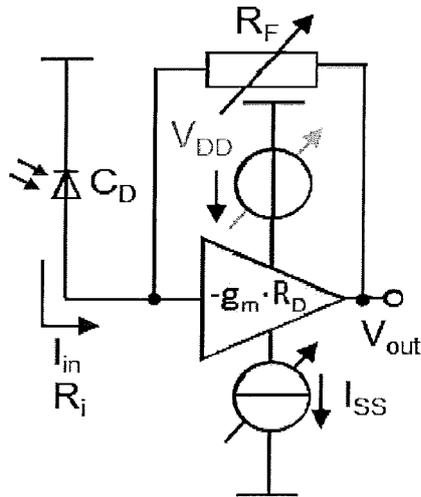


Fig. 3a

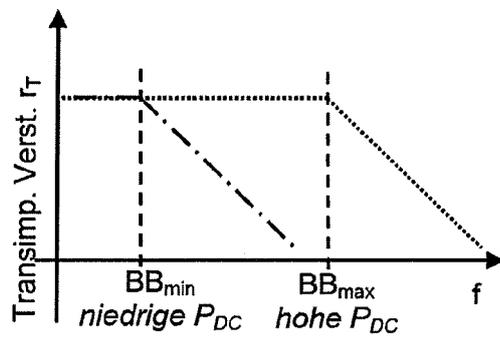


Fig. 3b

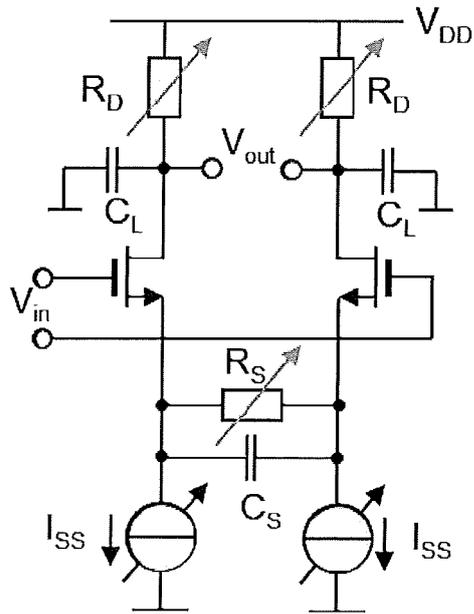


Fig. 4a

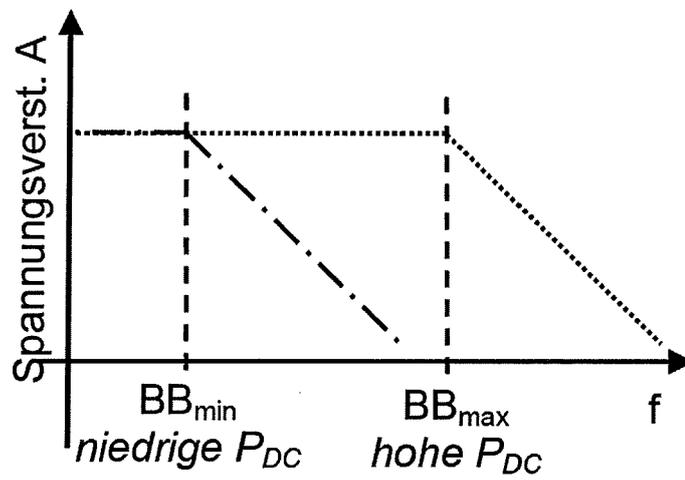


Fig. 4b

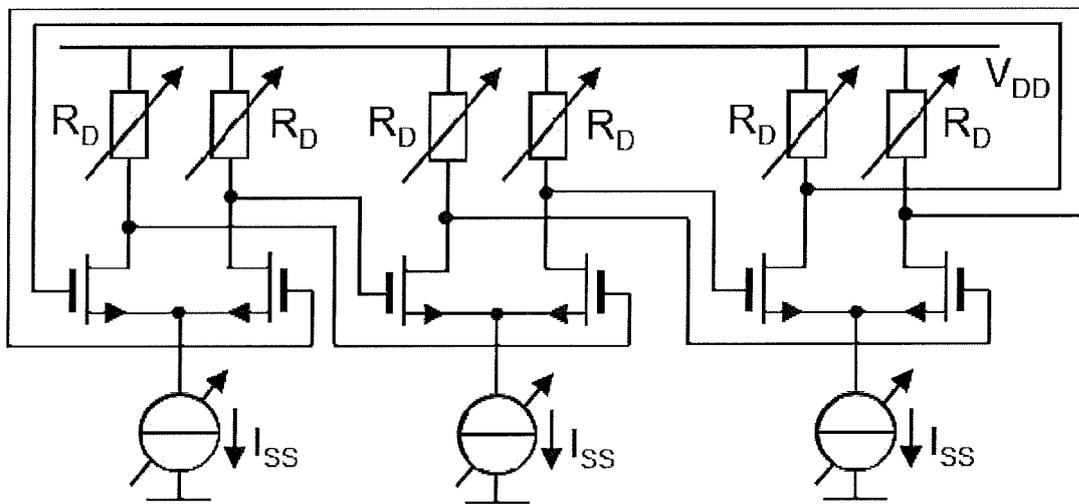


Fig. 5

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 7684710 B [0020]
- US 6862322 B [0020]
- US 7657191 B [0020]
- US 20090039847 A1 [0022]
- DE 69112890 T2 [0023]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **PETER KOGGE.** *IEEE Winter Topical Meeting Mallorca*, 2010, <http://www.nd.edu/~kogge/reports.html> [0007]
- **Q. WU ; P. JUANG ; M. MARTONOSI ; L.-S. PEH ; D.W. CLARK.** Formal control techniques for power-performance management. *IEEE Micro.*, vol. 25 (5), 52-62 [0011]
- Design issues for dynamic voltage scaling. **T. D. BURD ; R. W. BRODERSEN.** Proceedings of the 2000 international symposium on Low power electronics and design. ACM, 2000 [0011]
- **GANG QU.** What is the limit of energy saving by dynamic voltage scaling. *International Conference on Computer Aided Design*, 2001 [0011]
- **F. HÄBLER ; F. ELLINGER ; J. CARLS.** Analysis of buck-converters for efficiency enhancements in power amplifiers for wireless communication. *SB-MO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, 2007, 616-620 [0012]
- **R. WOLF ; F. ELLINGER ; R. EICKHOFF.** On the Maximum Efficiency of Power Amplifiers in OFDM Broadcast Systems with Envelope Following. *The 2nd International ICST Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems*, 2010 [0012]
- Energy Efficient Ethernet. Overview. **M. BENNETT.** ITU-T SG15. Geneva, Switzerland. Lawrence Berkeley National Laboratory, 15. Februar 2008 [0014]
- **LI SHANG ; LI-SHIUAN PEH ; JHA, N.K.;** Dynamic voltage scaling with links for power optimization of interconnection networks. *High-Performance Computer Architecture*, 2003 [0015]
- *Proceedings. The Ninth International Symposium*, Februar 2003, 91-1028-12 [0015]
- **B. LEIBOWITZ et al.** A 4A 4.3 GB/s Mobile Memory Interface With Power-Efficient Bandwidth Scaling. *IEEE Journal on Solid-State Circuits*, April 2010, vol. 45 (4) [0016]
- **J. ZERBE et al.** A 5.6Gb/s 2.4mW/Gb/s Bidirectional Link With 8ns Power-On. *IEEE IVLSI Symposium, Kyoto*, 2011 [0016]
- **KODI, A.K. ; LOURI, A.** Energy-Efficient and Bandwidth-Reconfigurable Photonic Networks for High-Performance Computing (HPC) Systems. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal*, März 2011, vol. 17 (2), 384-395 [0017]
- **AVINASH KARANTH KODI ; LOURI, A.** Power-Aware Bandwidth-Reconfigurable Optical Interconnects for High-Performance Computing (HPC) Systems. *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2007. IPDPS 2007. IEEE International*, 26. März 2007, 1-10 [0017]
- Energy Efficient OFDM Transceiver based on Traffic Tracking and Adaptive Bandwidth Adjustment. **J. HU ; D. QIAN ; T. WANG.** 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, OSA Technical Digest. Optical Society of America, 2011 [0019]
- **CHIH-KANG CHIEN ; HSIEH-HUNG HSIEH ; HUAN-SHENG CHEN ; LIANG-HUNG LU.** A Transimpedance Amplifier With a Tunable Bandwidth in 0.18-CMOS. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, März 2010, vol. 58 (3), 498-505 [0020]
- A CMOS Tunable Transimpedance Amplifier. **HUEI-YAN HWANG ; JUN-CHAU CHIEN ; TAI-YUAN CHEN ; LIANG-HUNG LU.** *Microwave and Wireless Components Letters. IEEE*, Dezember 2006, vol. 16, 693-695 [0020]
- **LEDIGLICH IN X. CHEN ; L.-SHIUAN. PEH.** Exploring the design space of power-aware opto-electronic network systems. *Proc. Of the 11th International Symposium on High-Performance Computer Architecture*, 2005, 120-131 [0021]
- **XUNING CHEN ; GU-YEON WEI ; LI-SHIUAN PEH.** Design of low-power short-distance opto-electronic transceiver front-ends with scalable supply voltages and frequencies. *ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design*, August 2008, 277-282 [0021]