

Ein neuer Ansatz zur Verbesserung der Energieeffizienz in radiologischen Versorgungseinheiten

A New Approach to the Improvement of Energy Efficiency in Radiology Practices

Autorinnen/Autoren
Hans-Martin Klein 

Institute

Greenscan GmbH, Medizinisches Zentrum am Siegerlandflughafen, Burbach, Germany

Key words

occupational/environmental hazards, CT, physics, MR imaging

eingereicht 05.04.2022

akzeptiert 30.12.2022

online publiziert 16.03.2023

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2023; 195: 416–425

DOI 10.1055/a-2021-7386

ISSN 1438-9029

© 2023. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Prof. Hans-Martin Klein
Greenscan GmbH, Medizinisches Zentrum am Siegerlandflughafen, Flughafenstr. 2a, 57299 Burbach, Germany

Tel.: +49/27 36/4 49 00 10

Fax: +49/27 36/4 49 00 11

mklein@greenscan-imaging.de

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel Wir untersuchten Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Radiologie durch regenerative Energieerzeugung bei Bau und Betrieb von 2 radiologischen Praxen.

Methode In den Jahren 2009 bis 2010 wurde ein energieoptimiertes Ärztehaus mit mehreren Fachrichtungen und einer radiologischen Praxis erstellt. Wir installierten eine Photovoltaik-Anlage mit einer Nennleistung von 29,92 kWp. Zur Heizung des Gebäudes wurde ein Wärmetauscher eingesetzt, der die Abwärme der Radiologie-Geräte nutzte und damit gleichzeitig die benötigte Kühlenergie reduziert. Die Praxis betreibt ein 1,5 T MRT und eine Computertomografie. Abgeleitet aus den Erfahrungen dieses Projektes wurde 2019 am gleichen Standort eine Praxis für offene MRT realisiert. Auch hier wurde ein energieoptimiertes Gebäude erstellt und eine

29,68 kWp PV-Anlage mit 10 kWh Li-Ionen-Batterie installiert. Die Praxis betreibt eine 0,35 T MRT mit Permanentmagnet.

Ergebnisse Die Energieoptimierung des Ärztehauses ermöglichte eine jährliche CO₂-Reduktion um etwa 54 % von ca. 153 146 auf ca. 70 631 kg/Jahr. Die Energiekosten verringerten sich um 32,5 %. Von großer Bedeutung war dabei der Einsatz des Wärmetauschers. In der Praxis für offene MRT betrug im Jahr 2020 der Verbrauch 38 810 kWh, davon 14 800 kWh für Heizung/Klimatisierung des Gebäudes und 24 010 kWh für die Praxisgeräte. Der Stromertrag der PV-Anlage lag bei 30 846 kWh. Der Nettoverbrauch lag bei 8397 kWh/Jahr, der CO₂-Ausstoß der Praxis lag bei 1839 kg CO₂/Jahr.

Schlussfolgerung Durch Einsatz von regenerativer Energie und Wärmerückgewinnung sowie Nutzung energieeffizienter Bildgebungssysteme kann die CO₂-Bilanz von radiologischen Versorgungseinheiten erheblich verbessert werden.

Kernaussagen:

- Die Radiologie, speziell die MRT, hat einen hohen Energieverbrauch.
- Durch Einsatz eines Wärmetauschers kann die Abwärme der Bildgebungssysteme zur Raumheizung rückgewonnen werden.
- Niederfeld-MRT mit Permanentmagneten benötigen nur einen Bruchteil der Energie eines Hochfeld-MRT.
- Energetische Optimierung führt zur Verbesserung der CO₂-Bilanz und Reduktion der Betriebskosten.

Zitierweise

- Klein HM. A New Approach to the Improvement of Energy Efficiency in Radiology Practices. Fortschr Röntgenstr 2023; 195: 416–425

ABSTRACT

Purpose We examined ways to improve energy efficiency in radiology by using regenerative and energy-friendly technology in the construction and operation of two radiological facilities.

Method In the years 2009 to 2010 an energy-optimized medical center with different clinical disciplines and a radiology practice was built. We used regenerative energy production (photovoltaic system, 29.92 kWp). A heat exchanger was also used to regain thermal energy to support heating of the building, thereby reducing cooling energy consumption.

The practice operates a 1.5 T MRI machine and a computed tomography scanner. Derived from our experiences, an open MRI practice was built nearby in 2019. The building was constructed using an energy-saving technique. A photovoltaic system with a 10 kWh lithium-ion battery was installed. The practice operates a 0.35 T open MRI machine.

Results Energy optimization of the medical center resulted in an annual CO₂ reduction of about 54 % from 153 146 to 70 631 kg/year. Energy costs were reduced by 32.5 %. The heat exchanger proved to be highly efficient. For the open

MRI practice, energy consumption in 2020 was 38 810 kWh: 14 800 kWh for the heating/cooling of the building, and 24 010 kWh for the imaging systems and IT. Net energy production of the solar array was 30 846 kWh. Net energy consumption for the whole project was 8397 kWh/year. CO₂ production of the practice was 1839 kg CO₂/year.

Conclusion Regenerative energy, energy recuperation, and use of energy-efficient imaging systems can yield considerable improvement of the CO₂ footprint in radiology practices.

Einleitung

Es ist ein Gebot der Klugheit, mit Ressourcen sparsam umzugehen. Dies gilt insbesondere für Ressourcen, deren Verfügbarkeit natürlich begrenzt ist. Ein wichtiger Faktor des Ressourcenverbrauchs ist die Energiegewinnung. Die Reduktion der Nutzung fossiler Rohstoffe und Förderung alternativer Formen der Energiegewinnung ist daher erklärtes Ziel der Vereinten Nationen [1].

Die Radiologie, insbesondere die MR-Tomografie mit supraleitenden Magneten, trägt erheblich zum Energieverbrauch in der Medizin bei [2]. Der Anteil der Radiologie am Gesamt-Energieverbrauch eines Krankenhauses der Maximalversorgung liegt bei ca. 4 % [3]. Eine Verbesserung der Energieeffizienz radiologischer Versorgungseinheiten ist daher dringend geboten [4].

Eine ökologische Optimierung führt häufig gleichzeitig zu einer Reduktion der Betriebskosten: Ökologie und Ökonomie können kongruente Prinzipien sein.

Der Kostendruck in Krankenhaus und Praxis wird in Zeiten steigender Energiepreise noch verschärft. Ein sparsamer Umgang mit der Ressource Energie kann somit die Verfügbarkeit hochwertiger Diagnostik für den Patienten nachhaltig verbessern.

Zur Steigerung der Energieeffizienz in der Radiologie steht mittlerweile eine Vielzahl von technischen und organisatorischen Möglichkeiten zur Verfügung, sowohl hinsichtlich des Energieverbrauchs der Bildgebungssysteme als auch zur alternativen Energieerzeugung und Energierückgewinnung.

In 2 radiologischen Praxisprojekten wurden diese Techniken eingesetzt, um den Primärenergie-Verbrauch zu reduzieren.

Am Beispiel eines Ärztehauses mit radiologischer Praxis wurde die Verwendung von Solarenergie und Wärmerückgewinnung geplant und realisiert.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse wurde danach am gleichen Standort eine Praxis für offenes MRT mit Eigennutzung von Solarenergie erstellt. Hierdurch wurde ein Vergleich der Energieeffizienz eines Niederfeld-MRT mit Permanentmagnet und eines Hochfeld-MRT mit supraleitendem Magnet möglich. Voraussetzung für die Verwendung eines solchen Systems ist eine diagnostisch ausreichende Bildqualität, die bei modernen Niederfeld-MRT gegeben ist [5].

Die vorliegende Arbeit untersucht Energieverbrauch und -produktion der installierten Komponenten. Neben einer quantitativen ökologischen Analyse erfolgt eine Bewertung der ökonomi-

schen Auswirkungen unter Berücksichtigung der aktuellen Bedingungen des Energiemarktes.

Methodik

Gebäude

Ärztehaus

Es handelt sich um ein viergeschossiges Gebäude in Massivbauweise. Die angesiedelten Fachdisziplinen umfassten im zugrunde gelegten Jahr (2012) neben der radiologischen Praxis eine nuklearmedizinische Praxis, Neurologie, Präventionsmedizin, Physiotherapie, Neurochirurgie und ein medizinisches Trainingszentrum. Die Nutzfläche beträgt 1800 m². Der Nachweis des „Energiesparenden Wärmeschutzes“ wurde entsprechend Energieeinsparverordnung (EnEV) 2007 erbracht [6]. Die radiologische Praxis betreibt einen Computertomografen, Ultraschall sowie einen 1,5 T Magnetresonanztomografen. Die Abwärme des MRT wird mittels Wärmetauscher rückgewonnen und zur Heizungsunterstützung verwendet. Auf dem Gebäudedach wurde eine Photovoltaik-Anlage installiert.

Praxis für Niederfeld-MRT

Das Gebäude wurde als Energiesparhaus in Holzständerbauweise ausgeführt (Fingerhut-Haus GmbH, Neunkhausen/Deutschland). Die Nutzfläche beträgt 240 m². Die Praxis betreibt einen 0,35 T Magnetresonanztomografen mit Permanentmagnet. Auf dem Gebäudedach wurde eine Photovoltaik-Anlage installiert.

Datenerhebung

Die Verbrauchsdaten des Ärztehauses für Strom und Gas wurden ermittelt.

Das Energiemonitoring der Praxis für offene Niederfeld-MRT erfolgte über eine Messelektronik (Sunny Portal, SMA Solar Technology AG, Niestetal).

Die Verbrauchswerte der Systemkomponenten wurden für die verschiedenen Betriebszustände der Komponenten durch je 5 Messungen im Abstand von 10 s gemessen. Der arithmetische Mittelwert wurde bestimmt.

Die Energiekonsumenten und -produzenten werden im Einzelnen betrachtet. Die Verbrauchswerte sind vielen Einflussgrößen

unterworfen. Soweit nötig wurden die Messergebnisse durch Hersteller- und Literaturangaben ergänzt.

Als Kenngröße für die energetische Effizienz wurde die Erzeugung von Kohlendioxid (CO₂) in Kilogramm (kg) herangezogen. Alle übrigen Energiegrößen wie Strom, Gasverbrauch oder thermische Energie (Wh) wurden auf die bei ihrer Erzeugung entstehende CO₂-Menge normiert [7].

Energiekonsumenten

Radiologie

MRT 1,5 T

Der MR-Tomograf der radiologischen Praxis des Ärztehauses ist ein 1,5 T System MRT Optima 450w (GE Healthcare, Solingen/Deutschland). Installationsdatum war der Dezember 2010. Die Verbrauchswerte wurden nach Herstellerangaben ermittelt [8].

MRT 0,35 T

Der MR-Tomograf der Praxis für offene Niederfeld-MRT ist ein offenes 0,35 T System mit Permanentmagnet, Typ Magnetom CI (Siemens Healthineers AG, Erlangen/Deutschland) [9]. Installationsdatum war der Februar 2019. Die Vorgaben der Qualitätsbeurteilungsrichtlinie Kernspintomografie des Gemeinsamen Bundesausschusses werden erfüllt [10]. Die Verbrauchswerte von Gerät und Klimaanlage wurden messtechnisch ermittelt.

CT

Der Computertomograf der radiologischen Praxis des Ärztehauses ist ein CT Optima 660 (GE Healthcare, Solingen/Deutschland). Installationsdatum war der Dezember 2010. Die Verbrauchswerte wurden nach Herstellerangaben ermittelt [11].

EDV

Ärztehaus

Das EDV-System der radiologischen Praxis ist ein RIS/PACS Centricity von General Electrics (GE Healthcare, Solingen/Deutschland). Es besteht aus 10 PC, 4 Druckern und 2 Servern (Hewlett-Packard, Böblingen/Deutschland). Ferner wird ein TV-Gerät zur Befunddemonstration eingesetzt (UE46/6000, Samsung Electronics, Schwalbach/Deutschland). Die Verbrauchswerte wurden nach Herstellerangaben sowie Literaturdaten ermittelt [12].

Praxis für Niederfeld-MRT

Das EDV-System der Praxis für offene Niederfeld-MRT ist von Dithurst/Telepaxx. Es besteht aus 6 PC HP Pavilion 27-d1609nz, 2 Servern (Hewlett-Packard, Böblingen/Deutschland) und 2 Druckern (Samsung ProXpress SL-C4060FX, Samsung, Schwalbach). Ferner sind 2 TV-Geräte (im Wartebereich und im Arztzimmer zur Befunddemonstration) in Betrieb, die bei der Energiemessung erfasst wurden (Samsung 7 Series 55 Zoll, Samsung Electronics GmbH Schwalbach/Deutschland). Der Energieverbrauch wurde messtechnisch ermittelt.

Heizung

Ärztehaus

Die Heizung des Ärztehauses erfolgt durch eine Gas-Brennwertheizung (Vitodens 200, Viessmann, Allendorf/Deutschland).

Praxis für Niederfeld-MRT

Die Heizung der Praxis für offene Niederfeld-MRT erfolgt durch Luft-Wasser-Wärmepumpe, Typ Vitocal 200 (Viessmann, Allendorf/Deutschland). Nennleistung 6,7 kW. Eine Wärmerückgewinnung erfolgt nicht.

Klimatisierung

Ärztehaus

Die Klimaanlage des Ärztehauses besteht aus einem 72 kW Aggregat mit variabler Kühlleistung und einem nicht regelbaren 72 kW Aggregat (Johnson Controls, Ratingen/Deutschland). Die Klimaanlage versorgt lediglich die technischen Geräte und den Bedienraum. Eine Kühlung der Büroräume und der EDV erfolgt darüber hinaus nicht.

Praxis für Niederfeld-MRT

Die Klimaanlage der Praxis für offene Niederfeld-MRT besteht aus einem 10 kW und einem 15,5 kW Außengerät (Toshiba Klimasysteme, Unterschleißheim/Deutschland). Alle Räume sind klimatisiert.

Energieproduzenten

Wärmetauscher (Ärztehaus)

Zur Energierückgewinnung und Unterstützung der Gebäudeheizung und des Warmwasserbedarfs wurde ein 90 kW Edelstahl-Platten-Wärmetauscher mit nachgeschaltetem 2500 l Pufferspeicher in den Kühlkreislauf der Schnittbildsysteme integriert. Es handelte sich um eine individuelle Lösung, die vom Installateur der Heizungsanlage (Fa. Peter Bohl, Herdorf/Deutschland) auf Anfrage realisiert wurde.

Photovoltaik-Anlage

Ärztehaus

Die Photovoltaik-Anlage des Ärztehauses ist von DCH (DCH Energy GmbH, Siegen/Deutschland). Die Anlagenleistung beträgt 29,92 kWp. Die Module wurden zur Verbesserung des Wirkungsgrades auf einem Aluminiumgestell mit 10 Grad Neigung installiert.

Praxis für Niederfeld-MRT

Die Photovoltaik-Anlage der Praxis für Niederfeld-MRT besteht aus 106 Modulen mit einer Modulleistung von 280Wp Typ Poly Sol 280Wp installiert (SMA Solar Technology AG, Niestetal/Deutschland). Die Anlagenleistung lag somit bei 29,68 kWp. Die Module wurden mit 5 Grad Dachneigung nach Süden orientiert installiert. Zur Glättung der Stromerzeugungs- und Verbrauchsspitzen sowie partieller Abdeckung des Nachtverbrauchs wurde

ein 10 kWh-Li-Ionen-Speicher Typ LGChem RESU 10H installiert (LG Energy Solution Europe, Sulzbach/Deutschland). Ausgenommen sind die Wärme-/Kältemaschinen, die über einen getrennten Zähler gemessen wurden.

Ergebnisse

Energiekonsumenten

Heizung/Klima

Ärztehaus

Der kalkulierte jährliche Primärwärmebedarf für Heizung betrug ca. 125 000 kWh/Jahr, für Warmwasser ca. 30 000 kWh/Jahr, in Summe ca. 155 000 kWh/Jahr.

Dies entspricht einer Verbrauchsmenge von ca. 37 000 l Flüssiggas. 1 Liter Flüssiggas verbrennt zu 2,16 kg CO₂. Die erwartete CO₂-Produktion lag somit bei ca. 80 000 kg/Jahr [7]. Der gemessene jährliche Gasverbrauch lag dagegen im Jahr 2020 bei 4600 l. Die resultierende CO₂-Produktion der Heizung der Praxis lag bei ca. 9927 kg/Jahr.

Praxis für Niederfeld-MRT

Der nach EnEV berechnete Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung betrug 14 944 kWh. Der gemessene Energieverbrauch im Jahr 2020 betrug 14 800 kWh. Die Abweichung des gemessenen vom berechneten Primärenergieverbrauch betrug unter 1%. Die resultierende CO₂-Produktion lag bei 3241 kg/Jahr.

Radiologie

MRT 1,5 T

Nach Herstellerangaben liegt für unser System die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb bei 12,25 kW. Im Aktiv-Modus ohne Bildaufnahme beträgt der Verbrauch ca. 19,65 kW, im Bildaufnahmebetrieb bei 32,44 kW, im Durchschnitt wird ein Wert von 28,6 kW während der Arbeitszeit angenommen [8].

Bei einer Auslastung von 250 Arbeitstagen/Jahr mit jeweils 10 h Betrieb liegt somit der jährliche Verbrauch während der Arbeitszeit bei ca. 71 500 kWh. Im Standby-Betrieb liegt der jährliche Verbrauch bei ca. 76 685 kWh. Der Gesamtverbrauch liegt bei ca. 148 200 kWh. Hierzu addiert sich der Energieverbrauch für die Kühlung. Nach Untersuchungen von Heye et al. [3] beträgt der Anteil der Kühlung am Gesamt-Energieverbrauch ca. 44,5%. Dies bestätigen Untersuchungen der Hochschule Hamm-Lippstadt [13]. Unter Zugrundelegung dieses Wertes beträgt der geschätzte jährliche Energiebedarf für die Klimatisierung des MRT ca. 121 200 kWh. Der erwartete jährliche Gesamt-Energieverbrauch der 1,5 T MRT liegt bei ca. 269 400 kWh. Die erwartete CO₂-Produktion liegt bei ca. 59 000 kg/Jahr.

MRT 0,35 T

Die Leistungsaufnahme im ausgeschalteten Zustand lag im Mittel bei 700 W. Im eingeschalteten Zustand ohne Scanbetrieb mit Klimaanlage lag die Leistungsaufnahme im Mittel bei 3,1 kW. Im

Scanbetrieb mit Klimaanlage wurden im Mittel 9,5 kW verbraucht. Die gemessenen Werte sind in Übereinstimmung mit den Herstellerangaben [9].

Die Klimaanlage verbrauchte im Mittel 3 kW. Für ein Arbeitsjahr mit 200 Arbeitstagen, jeweils 8 Arbeitsstunden und im Mittel 12 Patienten (mit je 20 min Scanzeit) sind ca. 7600 kWh im Aufnahmebetrieb, ca. 2500 kWh für Arbeitszeit ohne Scanbetrieb und ca. 6000 kWh für Stillstandzeiten zu erwarten. In Summe ca. 16 100 kWh. Die resultierende CO₂-Produktion lag bei ca. 3526 kg/Jahr.

CT

Nach Herstellerangaben liegt die Leistungsaufnahme im Tagesbetrieb bei ca. 2,56 kW. Die Leistungsaufnahme im Nachtbetrieb liegt bei ca. 2,11 kW, überwiegend durch die Gantry. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme pro Untersuchung beträgt ca. 160 W, bei 20 Untersuchungen am Tag ca. 3,2 kW/Tag. Die gesamte jährliche Leistungsaufnahme des CT beträgt ca. 20 200 kWh. Dazu kommen ca. 50 kWh für Kalibrationsscans. Die erwartete jährliche Leistungsaufnahme beträgt ca. 20 250 kWh [11].

Für die Kühlung des CT ist nach Herstellerangaben bei oben angegebenem Scanbetrieb eine Energie von ca. 17 558 kWh/Jahr aufzuwenden. Dies entspricht 46,4% des Energieverbrauchs der gesamten CT-Einheit.

Der erwartete jährliche Gesamt-Energieverbrauch der CT liegt bei ca. 37 800 kWh mit einer resultierenden CO₂-Produktion von ca. 8278 kg/Jahr (► **Abb. 1**).

EDV

Ärztehaus

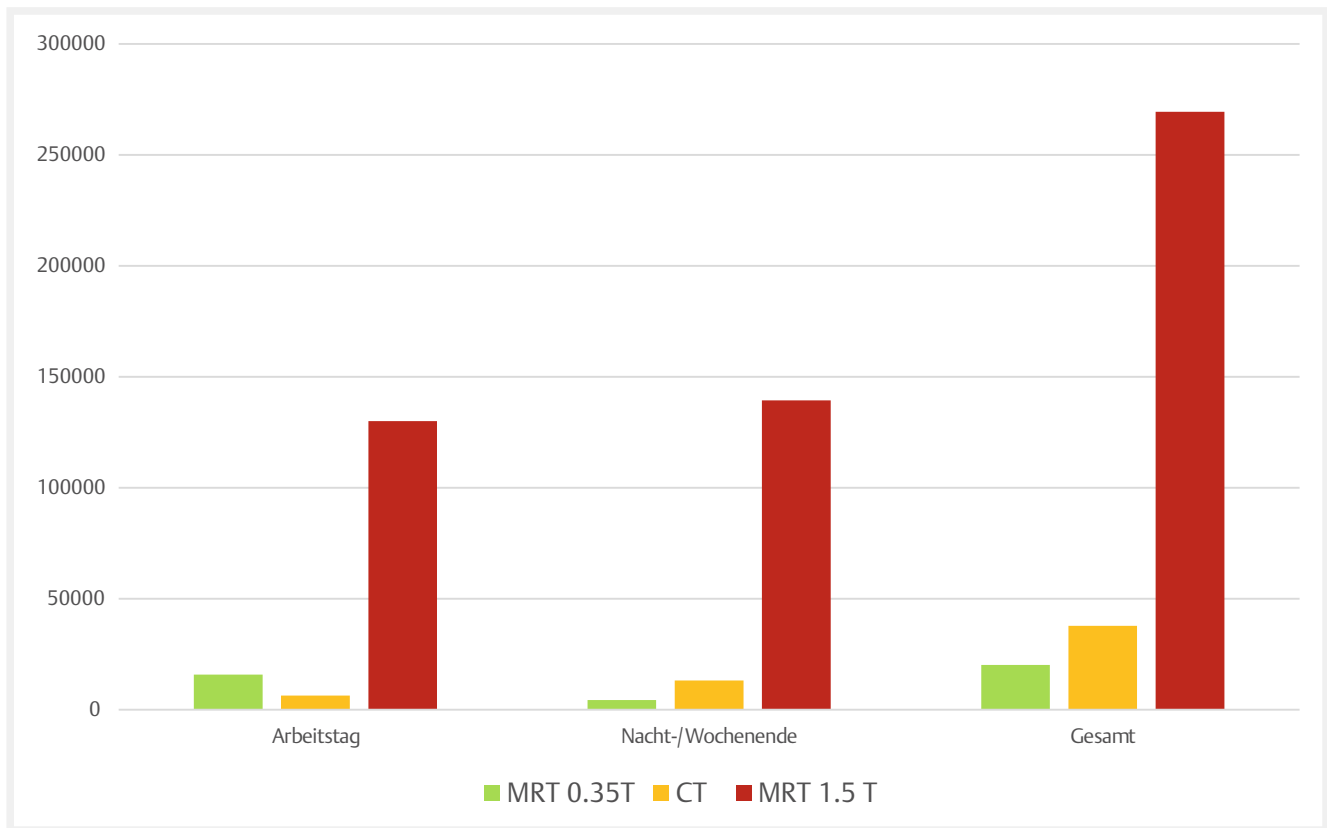
Die Leistungsaufnahme der 10 Arbeitsplatzrechner beträgt ca. 450 W im Arbeitsmodus, somit für alle Rechner ca. 4,5 kW während der Arbeitszeit. Die Leistungsaufnahme der 4 Drucker liegt bei ca. 400 W, für alle Drucker bei ca. 1,6 kW während der Arbeitszeit. Die beiden Server haben eine Leistungsaufnahme von je ca. 700 W bei permanentem Betrieb. Die Leistungsaufnahme liegt im Standby-Betrieb bei 1,4 kW (Server), im Arbeitsbetrieb bei ca. 7,5 kW [12].

Bei 250 Arbeitstagen mit einer Arbeitszeit von 10 Stunden/Tag werden im Standby-Betrieb ca. 8764 kWh/Jahr verbraucht. Im Arbeitsbetrieb werden ca. 18 750 kWh/Jahr verbraucht. In Summe liegt der erwartete jährliche Verbrauch bei 250 Arbeitstagen mit 10 Stunden für das EDV-System bei ca. 27 500 kWh/Jahr.

Die resultierende CO₂-Produktion liegt bei ca. 6000 kg/Jahr.

Praxis für Niederfeld-MRT

Die Herstellerangabe für die Leistungsaufnahme der Kompakt-PC liegt bei max. 135 Watt. Der gemessene Energieverbrauch für Arbeitsplatzrechner, Licht, und TV lag im Mittel bei 1,2 kW. Der Energieverbrauch des Servers lag bei 800 W. Bei 200 Arbeitstagen mit jeweils 8 Arbeitsstunden lag der Energieverbrauch im Standby-Betrieb bei ca. 5700 kWh, während der Arbeitszeit bei 3200 kWh. Die jährliche Leistungsaufnahme für Licht, TV und EDV-Systeme betrug ca. 8900 kWh.



► **Abb. 1** Jährlicher Energieverbrauch der Schnittbildgeräte [kWh/a]. Für Hochfeld-MRT und CT ist unter unseren Bedingungen die Leistungsaufnahme im Bereitschaftsbetrieb (Standby) aufgrund des kaum reduzierten Energieverbrauchs höher als während des Messbetriebs.

Die resultierende CO₂-Produktion lag bei 1949 kg/Jahr (► **Tab. 1**).

Energieproduzenten

Wärmetauscher

Der erwartete jährliche Primärwärmebedarf für Heizung und Warmwasser lag bei ca. 155 000 kWh/Jahr, entsprechend ca. 37 000 l Flüssiggas. Der tatsächliche jährliche Gasverbrauch lag im Jahr 2020 bei 4600 l. Der Erwartungswert wurde durch den Wärmetauscher somit um ca. 85 % unterschritten.

Photovoltaik

Ärztehaus

Die PV-Anlage erzeugte im Mittel 29 800 kWh/Jahr. Aufgrund der im Jahr 2010 noch sehr günstigen Vergütung von 0,39 Euro/kWh wurde der Stromertrag nicht selbst genutzt, sondern eingespeist.

Praxis für Niederfeld-MRT

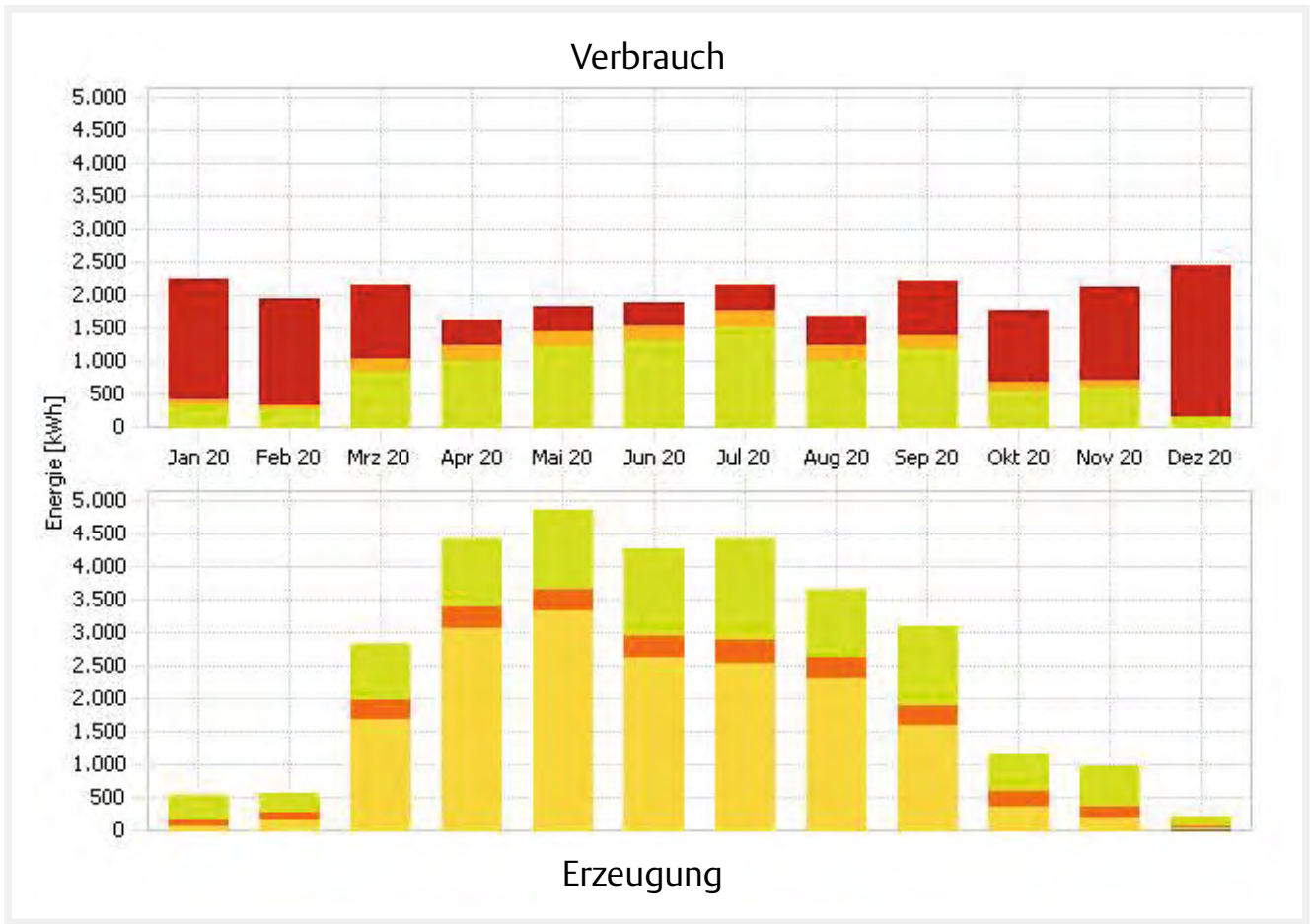
Der gemessene Stromertrag lag 2020 bei 30 846 kWh. Aufgrund der veränderten Einspeisevergütung hat heute der Eigenverbrauch zusätzlich zu ökologischen Aspekten auch deutliche wirtschaftliche Vorteile. Nahezu der gesamte Tagesbedarf wird in sonnenreichen Monaten durch Direktverbrauch gedeckt. Darüber

► **Tab. 1** Energiekonsumenten. Alle Angaben beziehen sich auf den Verbrauch für Gerätebetrieb und – kühlung sowie den Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung des Gebäudes (s. Text).

	Verbrauch	CO ₂ [kg/a]
Ärztehaus:		
MRT 1,5 T (inkl. Klima)	269 400 kWh/a	59 000
CT	37 800 kWh/a	8 278
EDV	27 500 kWh/a	6 000
Heizung	37 000 l Gas/a	79 846
Heizung mit Wärmetauscher	4 600 l Gas/a	9 927
Praxis für offene Niederfeld-MRT:		
MRT 0,35 T	16 100 kWh/a	3 526
EDV	8 900 kWh/a	1 949
Heizung/Klima (Praxis)	14 800 kWh/a	3 241

hinaus wird ein erheblicher Anteil des Solarstromes eingespeist (► **Abb. 2**).

Der Direktverbrauch lag bei 33 %. Durch den Batteriespeicher konnte die Eigenverbrauchsquote auf 41 % gesteigert werden. Die Autarkierate lag bei 51 %. Die Energieproduktion war im Jahresvergleich konstant, was für die Planung von Energie-autarken Kon-



► **Abb. 2** Energieprofil der Photovoltaik-Anlage im Jahr 2020. In den sonnenreichen Monaten überwiegen Eigenverbrauch (Direktverbrauch: Grün, Batterieversorgung: Rot) und Netzeinspeisung (Gelb) weitaus den Netzbezug (Dunkelrot). In den sonnenarmen Monaten wird der Energiebedarf überwiegend durch Netzbezug gedeckt.

zepten bedeutsam ist. Die CO₂-Einsparung betrug im Jahr 2020 6755 kg (► **Tab. 2**).

Energiebilanz

Ärztelhaus

Der erwartete Energiebedarf für Heizung und Warmwasser lag bei 155 000 kWh/Jahr. Dies entspricht etwa 37 000 l Gas. Der tatsächliche Energiebedarf lag bei 4600 l Gas/Jahr, entsprechend 19 270 kWh. Die benötigte Heizenergie wurde durch den Wärmetauscher um ca. 85 % reduziert. 1 Liter Flüssiggas produziert 2,16 kg CO₂ [7]. 37 000 l Gas entsprechen 79 846 kg CO₂. 4600 l Gas entsprechen ca. 9927 kg CO₂.

Es resultiert eine Einsparung von 32 400 l Gas/Jahr, entsprechend ca. 69 000 kg CO₂.

Der erwartete jährliche Stromverbrauch für MRT, CT und EDV lag bei ca. 334 700 kWh. Der gemessene Stromverbrauch lag im Jahr 2012–2020 bei 307 000 kWh. 334 700 kWh entsprechen ca. 73 300 kg CO₂, 307 000 kWh entsprechen ca. 67 230 kg CO₂.

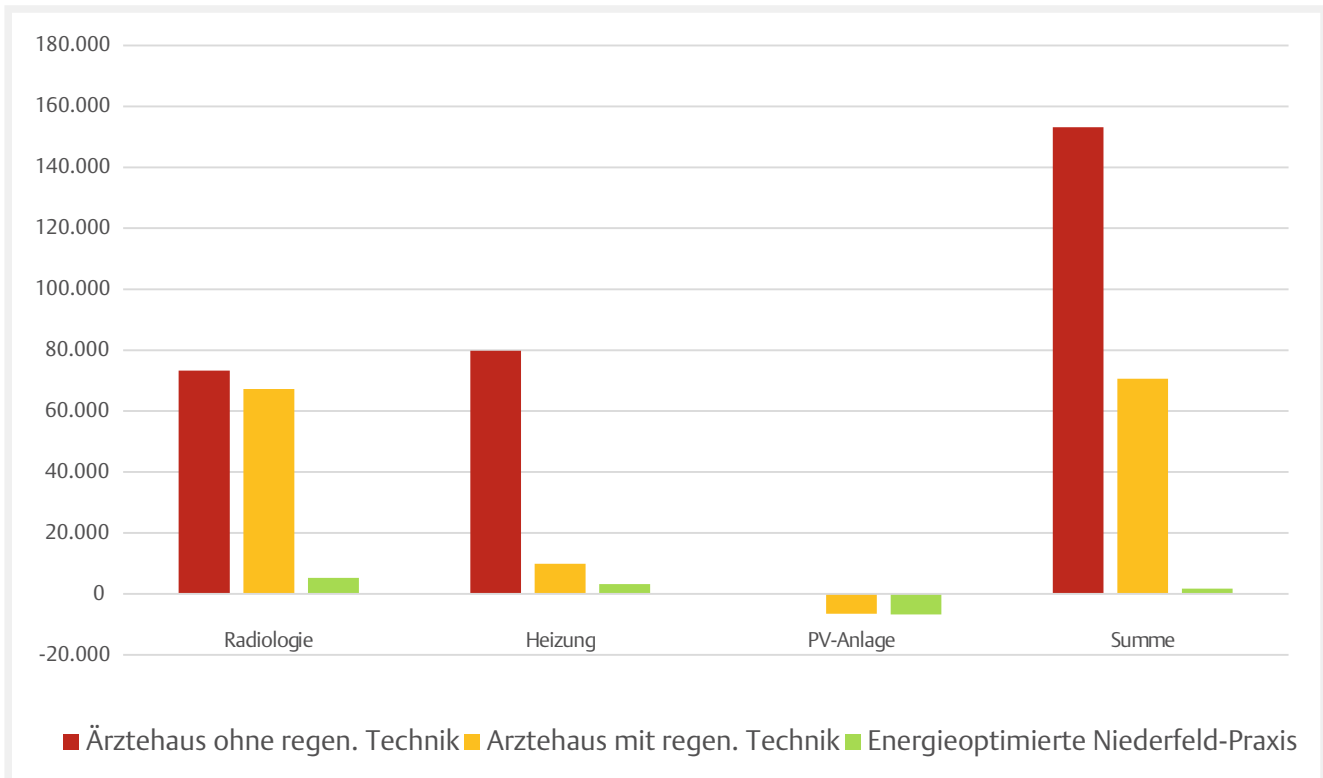
Es resultiert eine Einsparung von ca. 27 700 kWh/Jahr oder ca. 6066 kg CO₂ /Jahr.

► **Tab. 2** Energieproduzenten. Effekt der regenerativen Energiemaßnahmen. Die Kosteneinsparung geht von einem Direktverbrauch des Ertrags der PV-Anlagen und aktuellen Strom- und Gaspreisen aus (0,46 €/kWh und 1,28 €/l, Stand Mai/Juni 2022).

	Einsparung	CO ₂ [kg/a]	Kostenreduktion [€]
Ärztelhaus:			
Wärmetauscher	32 400 l Gas	69 000	47 360
PV-Anlage	29 800 kWh	6526	13 708
Praxis für offene Niederfeld-MRT:			
PV-Anlage	30 846 kWh	6755	14 189

Die Photovoltaik-Anlage erzeugte im Mittel 29 800 kWh/Jahr, entsprechend einer CO₂-Einsparung von 6526 kg CO₂/Jahr.

Ohne regenerative Methoden wäre eine CO₂-Produktion von 153 146 kg /Jahr zu erwarten. Durch regenerative Technik wurde der CO₂-Ausstoß um ca. 54 % auf 70 631 kg CO₂ gesenkt.



► **Abb. 3** Ökologischer Effekt (in kg CO₂/a) von radiologischen Geräten (Bildgebungssysteme, Gerätekühlung, EDV), Heizung und Stromerzeugung durch Photovoltaik. Rot: Ärztehaus ohne regenerative Technik, Orange: Ärztehaus mit regenerativer Technik, Grün: Niederfeld-Praxis.

Praxis für Niederfeld-MRT

Die Stromertrag der Photovoltaik-Anlage betrug 30 846 kWh im Jahr 2020, entsprechend ca. 6755 kg CO₂.

Der gemessene jährliche Verbrauch der Wärme- und Kälteerzeuger betrug 14 800 kWh, entsprechend 3241 kg CO₂. Dieser wurde durch Netzbezug gedeckt.

Der Strombedarf für Praxisgeräte (MRT und EDV) lag bei 24 010 kWh im Jahr 2020 und damit etwas unter dem Erwartungswert von 25 000 kWh/Jahr. Dieser Stromverbrauch wurde primär durch die PV-Anlage gedeckt.

Überschüsse wurden eingespeist, Unterversorgung wurde durch Netzbezug kompensiert. Hierbei wurden 10 130 kWh direkt verbraucht. 2524 kWh wurden über die Batterie zwischengespeichert, 2064 kWh der Batterie entnommen (Wirkungsgrad 82%). Die Netzeinspeisung betrug 18 218 kWh. Der Netzbezug 11 815 kWh. Die Autarkierate lag bei 51%. Die Bilanz der Praxisgeräte war mit -6403 kWh/Jahr, entsprechend -1402 kg CO₂/Jahr negativ.

Korrigiert man den Verbrauch der Heizung- und Klimageräte um diesen Negativbetrag, resultiert ein jährlicher Nettoenergieverbrauch 8397 kWh entsprechend 1839 kg CO₂ (► **Abb. 3**).

Ökonomischer Effekt des Einsatzes regenerativer Verfahren

Ärztehaus

Der zu erwartende Aufwand für die Gebäudeheizung lag bei ca. 37 000 l Gas bei einem aktuellen Gaspreis von 1,28 Euro/l inkl. MWSt. entspricht dies 47 360 Euro/Jahr.

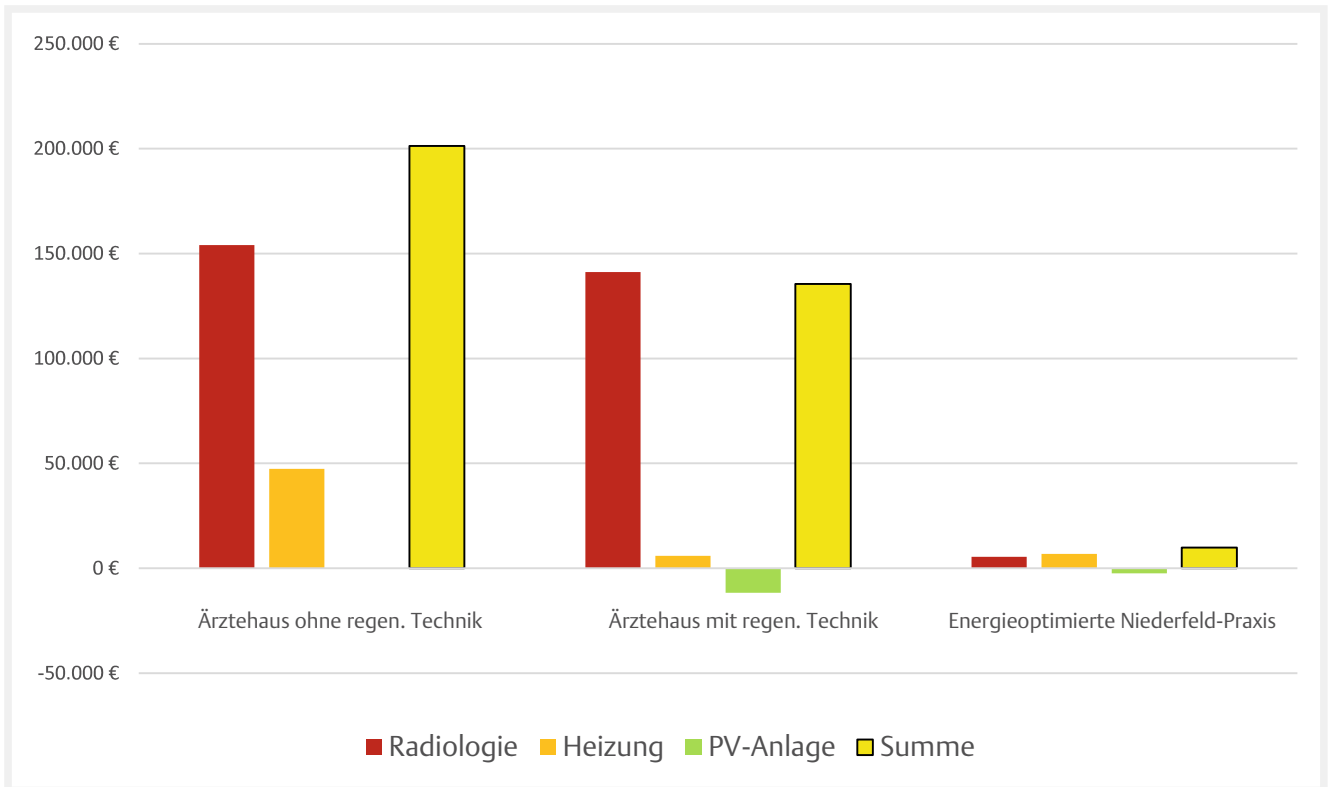
Der tatsächliche Gasverbrauch lag bei 4600 l/Jahr, entsprechend 5888 Euro.

Der zu erwartende Stromverbrauch lag bei 334 714 kWh/Jahr. Dies entspricht bei einem aktuellen Strompreis von 46 ct/kWh (Großverbraucher, Stand Mai 2022) einem Preis von 153 968 Euro. Der tatsächliche Stromverbrauch lag bei 307 000 kWh/Jahr, entsprechend 141 220 Euro.

Die PV-Anlage lieferte im Durchschnitt 29 800 kWh/Jahr. Der Strom wurde zum Preis von 39 ct/kWh eingespeist. Die Vergütung belief sich auf 11 622 Euro/Jahr.

Die erwarteten Gesamtkosten für Energie betragen 201 328 Euro/Jahr.

Die tatsächlichen Energiekosten (bei Neuabschluss eines aktuellen Versorgungsvertrages) betragen ca. 135 486 Euro. Die Energiekosten konnten somit durch regenerative Maßnahmen um ca. 32,7% oder ca. 65 842 Euro/Jahr gesenkt werden. Durch Direktverbrauch des Stroms wäre aktuell eine noch größere Kostensparnis möglich (► **Abb. 4**).



► **Abb. 4** Reduktion der Energiekosten durch Einsatz regenerativer Technik für die drei Szenarien: Ärztelhaus ohne regenerative Technik, Ärztelhaus mit regenerativer Technik und energieoptimierte Niederfeld-Praxis.

Praxis für offene Niederfeld-MRT

Strom wurde als einziger Energieträger verwendet. Der Gesamtstromverbrauch lag pro Jahr bei 38 810 kWh. Dies entspricht bei aktuellen Strompreisen Kosten von 17 853 Euro.

Die PV-Anlage lieferte 30 846 kWh/Jahr. Bei vollständiger Eigennutzung würde ein Primärenergieverbrauch von 7964 kWh/Jahr bei Kosten von 3663 Euro resultieren. Dies scheidet noch am Fehlen der Möglichkeit einer Langzeitspeicherung überschüssiger Energie.

Der Energiebedarf von 14 800 kWh für Heizung und Klima entsprach Kosten in Höhe von 6808 Euro.

Der Praxisverbrauch wurde in Höhe von 12 646 kWh durch Eigenverbrauch gedeckt. 11 815 kWh wurden zum Preis von 5434 Euro aus dem Netz bezogen. 18 218 kWh wurden zum Preis von 13 ct ins Netz eingespeist und reduzierten die Kosten um 2368 Euro.

Die Gesamtenergiekosten der energieoptimierten Niederfeld-Praxis betragen somit, bei aktuellen Energiepreisen, im Jahr 2020 9874 Euro.

Diskussion

Die Materie ist komplex und für Radiologen auf den ersten Blick fachfremd. Gleichwohl fällt in unseren Verantwortungsbereich die Logistik radiologischer Versorgungseinheiten und damit die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Optimierung der

Wirtschaftlichkeit sowie, in den letzten Jahren zunehmend im Fokus, die Wahrnehmung von Verantwortung für die ökologische Effizienz unseres Arbeitsumfeldes [4, 14, 15].

Um die Thematik zu erfassen, müssen 3 Bereiche betrachtet werden:

Gebäudetechnik, Energieverbraucher und Energieerzeuger. Dazu kommen Aufgaben der Arbeits- und Prozessoptimierung, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Die Planung von Neubauten muss Maßnahmen zur Energieeinsparung berücksichtigen. Für den Bau des Ärztelhauses im Jahr 2009 waren die Bedingungen der Energieeinsparverordnung 2007 einzuhalten [6]. Diese fordert für neue Nichtwohngebäude, dass der Energiebedarf den eines Referenzgebäudes mit vorgegebener technischer Ausstattung nicht überschreitet. Nach EnEV § 4, Satz 4 werden regenerative Heizsysteme begünstigt. Zu diesen gehört auch die Wärmerückgewinnung aus dem Kühlkreislauf eines MRT-Systems. Zusätzlich zur Einhaltung der übrigen Voraussetzungen wurde daher ein Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung und Unterstützung der Gebäudeheizung eingesetzt [16].

Das Gebäude der Niederfeld-Praxis wurde in energieoptimierter Holzrahmen-Bauweise errichtet. Diese Bauweise ermöglicht ausgezeichnete Transmissionswärme-Koeffizienten und eine schnelle bauliche Realisierung. Von einer Wärmerückgewinnung wurde aufgrund der geringen erwarteten Abwärmemenge zunächst abgesehen.

Supraleitende MR-Tomografen sind die größten Energiekonsumenten der Radiologie [3, 14]. Neben HF-Sender und Gradiententechnik ist insbesondere die Magnetkühlung von Bedeutung, die sowohl im Scan- als auch im Standby-Betrieb Energie konsumiert [13]. Die Standby-Leistungsaufnahme liegt bei unserem Gerät bei ca. 12,2 kW. Sie ist für über 50 % des Gesamt-Energieverbrauches des MRT verantwortlich.

Die Hersteller haben das Problem realisiert und in neueren Gerätegenerationen den Energiebedarf unter 10 kW im Standby und unter 20 kW im Scanbetrieb gesenkt [17, 18]. Ein weiterer ökologisch relevanter Faktor ist der Bedarf an flüssigem Helium als Kühlmittel. Neuere heliumsparende Systeme kommen durch geändertes Spulendesign mit ca. 7 Liter statt der bisher ca. 1000 Liter aus.

In den letzten Jahren ist es zu einer Neubewertung von MRT-Systemen mit geringerer Feldstärke gekommen [5, 19–21]. Durch Einsatz moderner Techniken der Signal- und Bildverarbeitung können auch Geräte mit Feldstärken von 0,5 T und weniger die Anforderungen an diagnostische Bildqualität erfüllen. Methoden der KI-basierten Bildrekonstruktion lassen weitere Verbesserung erwarten [22]. Geringere Feldstärke bietet ferner Vorteile durch weniger Suszeptibilitäts-Artefakte, kürzere T1-Zeit, besseren T1-Kontrast und eine deutlich geringere HF-Energieexposition [6, 20, 23, 24]. Aus diesem Grund werden aktuell neue Hochleistungs-MRT mit einer Feldstärke von 0,55 T entwickelt und sind bereits kommerziell verfügbar [6]. MRT-Systeme mit Permanentmagneten haben den geringsten Energieverbrauch. Vorteilhaft bieten diese Magneten die Möglichkeit eines offenen Designs, eine nahezu unbegrenzt lange Haltbarkeit (Neodym-Magnete) und einen heliumfreien Betrieb.

Allerdings haben sie ein im Vergleich zu supraleitenden Systemen ein etwa 4-fach höheres Gewicht. Bei Produktion von 1 t Rohstahl werden ca. 2600 kWh Strom verbraucht und ca. 1,7 t CO₂ freigesetzt [25]. Die Produktion eines Permanentmagneten verursacht somit ca. 24 t CO₂, ein supraleitender Magnet ca. 7 t. Die Differenz von 17 t CO₂ wäre bei einer CO₂-Einsparung im Betrieb von ca. 56 t/Jahr bei Verwendung eines MRT mit Permanentmagnet nach etwa 4 Monaten ausgeglichen.

Für MRT-Systeme mit geringerer Feldstärke sind weitere alternative Magnetetechniken denkbar. So wurde bereits in den 90er-Jahren ein offener 0,35 T Magnet mit einem Hochtemperatur-Supraleiter entwickelt und klinisch eingesetzt [26].

In der Computertomografie spielt der Röhrenstrom im Scanbetrieb für den Energiekonsum nur eine untergeordnete Rolle [3, 11, 13]. Demgegenüber liegt der Verbrauch der Gantry sowohl im Standby- als auch im Scanbetrieb bei konstant ca. 2 kW. Einige Computertomografen neuerer Generation sehen einen Energiesparmodus vor, der eine erhebliche Verbesserung der Energieeffizienz bewirkt.

Die EDV trägt nicht unerheblich zum Energiekonsum bei. Der große Unterschied im Energieverbrauch der EDV zwischen dem radiologischen Institut des Ärztehauses und der Niederfeld-Praxis erklärt sich zum Teil aus der größeren Zahl der Arbeitsplätze. Zudem wurden in der Praxis für Niederfeld-MRT stromsparende PC und Drucker verwendet. Der Energieverbrauch der IT-Systeme kann in den kommenden Jahren, z. B. durch neuronale Netze mit leistungsfähigen Grafikkarten, durchaus noch zunehmen [22].

Durch den hohen und permanent anfallenden Energieverbrauch stellen supraleitende Magneten eine ganzjährig verfügbare Wärmequelle von ca. 10–15 kW dar, die insbesondere in den Wintermonaten nahezu vollständig für die Gebäudeheizung genutzt werden kann [16, 18]. Hier eröffnet sich eine echte Chance zur Verbesserung der Energieeffizienz der Radiologie, die allerdings eine Zusammenarbeit mit der Gebäudetechnik voraussetzt. Die Rückgewinnung der durch den MRT-Betrieb anfallenden thermischen Energie führte in unserem Projekt zu einer Heizkosteneinsparung von deutlich über 80 %. Da der Primärenergieverbrauch der Heizung ohne Nutzung eines Wärmetauschers nicht gemessen, sondern nur anhand der baulichen Erwartungswerte berechnet wurde, ist eine Fehleinschätzung nicht auszuschließen. Soweit die Berechnungen durch Messungen validiert wurden, zeigte sich weitgehende Übereinstimmung.

Neben der direkten Einsparung von Heizenergie wird zusätzlich Energie für die Kühlung der Praxisräume und der radiologischen Geräte eingespart. Ein Wärmetauscher ist somit in Kombination mit einer Heizungsunterstützung in der Lage, einen wesentlichen ökologischen Nachteil von supraleitenden Hochfeld-MRT zumindest teilweise auszugleichen.

Der Einsatz einer Photovoltaik-Anlage führte in beiden Bauprojekten zu einer erheblichen Verbesserung der ökologischen Bilanz. Beim Bau des Ärztehauses lag die Einspeisevergütung für Aufdachanlagen mit 39 ct/kWh noch deutlich über dem Strompreis. Heute beträgt die Einspeisevergütung nur noch ca. 25 % des Strompreises bei Neuverträgen, so dass einer Eigennutzung des Solarstromes, wie auch ökologisch sinnvoll, der Vorzug gegeben werden sollte.

Photovoltaik-Anlagen zeigen mit der Zeit einen Abfall der Energieproduktion, die sogenannte „Degradation“. Dieser Abfall erfolgt bei modernen PV-Modulen aber so langsam, dass er messtechnisch kaum zu erfassen ist. Nach einer Studie des Fraunhofer-Institutes liegt die Degradation in Deutschland im Mittel bei 0,15 kWp/Jahr [27] (s. ► **Abb. 4**).

Die Energieproduktion der Photovoltaik ist standortabhängig. Die prognostizierte jährliche Sonneneinstrahlung beträgt an unserem Standort ca. 1100 kWh/Jahr [28]. Im Raum Freiburg liegt der Vergleichswert bei ca. 1300 kWh/m². Die beste Absorption ist bei Südausrichtung der Elemente und einem Installationswinkel von 30 % zu erzielen. Das Produktionsprofil ist erstaunlich konstant und übersteigt die standortbezogene Prognose um ca. 10 %.

Um die Eigennutzungsrate zu verbessern, ist der Einsatz eines Batteriespeichers sinnvoll, der überschüssigen Strom für die Nutzung in Zeiten nicht ausreichender Sonneneinstrahlung oder erhöhten Verbrauchs zwischenspeichert. Er kompensiert somit untertägige Schwankungen von Produktion und Verbrauch. Zu berücksichtigen ist die CO₂-Produktion bei der Herstellung von Batterien. Sie liegt für Li-Ionen-Batterien bei ca. 80 kg CO₂/kWh. Bei der Produktion einer 10 kWh Li-Ionen-Batterie somit 800 kg CO₂, die bei unserem Betriebskonzept in knapp 2 Jahren durch Erhöhung des Direktverbrauches eingespart werden [29].

Sobald ein Konzept für eine Langzeitspeicherung von elektrischer Energie verfügbar ist, kann ein Energie-autarker Betrieb realisiert werden [30]. Energie-Überschüsse der Photovoltaik könnten dann in den Sommermonaten gespeichert und bei Unterdeckung in den Wintermonaten genutzt werden. Ein solches

Konzept könnte die chemische Energiespeicherung sein, z. B. durch Kombination eines Wasserstoffgenerators mit einer Brennstoffzelle. Zudem stehen Konzepte für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen (e-Fuels) kurz vor der Serienreife [31].

Die Optimierung der Energieeffizienz moderner radiologischer Versorgungseinheiten ist eine technische und organisatorische Herausforderung. Für ihre Umsetzung steht eine Vielzahl von technischen Möglichkeiten zur Verfügung.

Es ist unsere Aufgabe, diese konsequent einzusetzen mit dem Ziel einer leistungsfähigen, nachhaltigen Radiologie.

FAZIT FÜR DIE PRAXIS

- Der hohe Energieverbrauch radiologischer Geräte, insbesondere des MRT, kann durch Einsatz von regenerativer Energie und Energierückgewinnung kompensiert werden.
- Von großer Bedeutung ist hierbei der Einsatz eines Wärmetauschers in der Kühlkette des MRT.
- Niederfeld-MRT mit Permanentmagneten verbrauchen im Vergleich zu supraleitenden Systemen erheblich weniger Energie.
- Eine Verbesserung der Energieeffizienz führt neben einer Reduktion der CO₂-Bilanz auch zu einer Senkung der Energiekosten.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] GE Healthcare. MRT Optima 450w – Preinstallation Manual. 2014: 54–56
- [2] Rohde T, Martinez R. Equipment and Energy Usage in a Large Teaching Hospital in Norway. *J Healthc Eng* 2015; 6 (3): 419–433
- [3] Heye T, Knoerl R, Wehrle T et al. The Energy Consumption of Radiology: Energy- and Cost-saving Opportunities for CT and MRI Operation. *Radiology* 2020; 295: 593–605
- [4] Perez JL, Gunderman RB. The Need for an Ecologic Understanding of Radiology Practice. *American Journal of Roentgenology* 2021; 216: 844–846
- [5] Campbell-Washburn AE, Ramasawmy R, Restivo MC et al. Opportunities in Interventional and Diagnostic Imaging by Using High-Performance Low-Field-Strength MRI. *Radiology* 2019; 293: 384–393
- [6] Tuschinski M. EnEV 2007 - EnEV-Online (Accessed July 16, 2022). 2007 https://enev-online.net/enev_2007/04_anforderungen_nichtwohngbaeude.htm
- [7] Umweltbundesamt Österreich. Berechnung von Treibhausgas (THG). 2019. (Accessed July 16, 2022) <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>
- [8] GE Healthcare. MRT Optima 450w – Preinstallation Manual. 2014: 54–56
- [9] Siemens Healthineers. Magnetom C! Technical data. Siemens. 2008; 44: <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2020/11/JN/AA/UY/6944459/siemens-magnetom-c-mri.pdf>
- [10] Gemeinsamer Bundesausschuss. Qualitätsbeurteilungs-Richtlinie Kernspintomografie. Banz AT (2019) 30.01.2020 B3 (Accessed July 16. 2022) <https://www.g-ba.de/richtlinien/21/>
- [11] GE Healthcare. CT Optima 660 – Preinstallation Manual. 2018: 115ff
- [12] Energieratgeber. Der Stromverbrauch eines PCs. I&E Energy. 2022. (Accessed July 16, 2022) <https://www.energie.web.de/ratgeber/verbrauch/stromverbrauch-pc-computer/#:~:text=So%20hoch%20ist%20der%20Stromverbrauch%20eines%20durchschnittlichen%20PCs&text=Ein%20PC%20mit%20modernem%20Mehrkern,Stromverbrauch%20von%20rund%20200%20kWh>
- [13] Witt D, Brüning C. CT, MRT & CO: Wieviel Strom verbrauchen Großgeräte? kma – Klinik Management aktuell 2017; 22: 75
- [14] Bujak JW. Production of waste energy and heat in hospital facilities. *Energy* 2015; 91: 350–362
- [15] Kolokotsa D, Tsoutsos T, Papantoniou S. Energy conservation techniques for hospital buildings. *Adv Build Energy Res* 2012; 6 (1): 159–172
- [16] Noie-Baghban SH, Majideian GR. Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals. *Appl Therm Eng* 2000; 20 (14): 1271–1282
- [17] COCIR Self-Regulatory Initiative for the Ecodesign of Medical Imaging Equipment. Status Report. COCIR 2018. https://www.cocir.org/fileadmin/6_Initiatives_SRI/SRI_Status_Report/COCIR_SRI_Status_Report_2018_-_June_2019.pdf Accessed July 16, 2022
- [18] Hermann C, Rock A. Magnetic Resonance Equipment (MRI) – study on the potential for environmental improvement by the aspect of energy efficiency. <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/nam2/docs/herrmann.pdf> Accessed July 16, 2022
- [19] Bandenetti WP, Shanbhag SM, Mancini C et al. A comparison of cine CMR imaging at 0.55 T and 1.5 T. *Cardiovasc Magn Reson* 2020; 22 (1): 37
- [20] Klein HM. Niederfeld-Magnetresonanztomographie. *Fortschr Röntgenstr* 2020; 192: 537–548
- [21] Pogarell T, May MS, Nagel AM et al. Muskuloskeletale Bildgebung in der Niederfeld-MRT. *Radiologe* 2022; 62 (5): 410–417
- [22] Arndt C, Güttler F, Heinrich A et al. Deep Learning CT Image Reconstruction in Clinical Practice. *Fortschr Röntgenstr* 2021; 193: 252–261
- [23] Kaufman L, Arakawa M, Hale J et al. Accessible MR-Imaging. *Magn Reson* 1989; 5: 283–297
- [24] Kuhl CK, Träber F, Schild HH. Whole body high-field strength MR imaging in clinical practice. Part 1: Technical considerations and clinical application. *Radiology* 2008; 246 (3): 675–696
- [25] Rocky Mountain Institute. <https://rmi.org/wp-content/uploads/2019/09/green-steel-insight-brief.pdf> Accessed September 29, 2022.
- [26] Lvovsky Y, Jarvis P. Superconducting systems for MRI-present solutions and new trends. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2005; 15(2): 1317–1325
- [27] Kiefer K, Farnung B, Müller B. Degradation in PV Power Plants: Theory and Practice. 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Marseille, 2019
- [28] Broer G. PV-Ertrag online berechnen. <https://www.solarserver.de/pv-anlage-online-berechnen>
- [29] Emilsson E, Dahllöf L. Lithium-Ion Vehicle Battery Production. Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. Swedish Energy Agency. 2019 <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf> Accessed July 16 2022
- [30] Klein HM. Clinical Low Field Strength Magnetic Resonance Imaging; Springer; 2016: 143ff
- [31] Köll C. Sauber tanken. Lookit, Karlsruher Institut für Technologie. 2021; 2: 28–32