



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050)

LEITFADEN BAHNTECHNIKGEBÄUDE

Energieeffizienz im Technikraum

Schlussbericht

Markus Widmer, EK Energiekonzepte AG

Sihlquai 55, 8005 Zürich, m.widmer@energiekonzepte.ch, www.energiekonzepte.ch

Projektpartner

Matthias Rücker, SBB AG, Industriestrasse 1, 3052 Zollikofen (Projektleitung)

René Obrist, SBB AG, Hilfikerstrasse 3, 3000 Bern 65

Mario Nikolic, SBB AG, Vulkanplatz 11, 8048 Zürich

Sven Scherer, BLS Netz AG, Genfergasse 11, 3001 Bern

Niculin Vital, Rhätische Bahn AG, Bahnhofstrasse 25, 7001 Chur

Markus Widmer, EK Energiekonzepte AG, Sihlquai 55, 8005 Zürich

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 141

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 19.6.2020





EXECUTIVE SUMMARY (D/F/E)	7
ZUSAMMENFASSUNG (D)	10
RÉSUMÉ (F)	20
1. WORUM GEHT ES?	33
2. HERAUSFORDERUNG	34
2.1 Energieeffizienz im Bahntechnikgebäude	34
2.2 Warum Bahntechnikgebäude?	34
2.3 Herausforderungen und Aufbau des Dokuments	35
3. METHODIK	37
3.1 Form und Inhalt des Leitfadens	37
3.2 Viele Freiheitsgrade durch thermische Simulationen	38
3.3 Modellvalidierung	39
3.4 Charakterisierung des exemplarischen BTG	44
4. ANALYSE UND ERKENNTNISSE	48
4.1 Raumanforderungen	48
4.1.1 Raumsolltemperaturen	48
4.1.2 Luftwechselrate	49
4.1.3 Raumluftfeuchtigkeit	50
4.2 Interne Lasten in der Praxis	51
4.2.1 Interne und externe Lasten	51
4.2.2 Flächen- und Leistungsreserven	55
4.3 Optimierung der Gebäudehülle von Technikräumen	57
4.3.1 Materialisierung und Wärmedämmung	58
4.3.2 Effekte des Standortklimas	63
4.4 Prinzipien der Kühlung im Technikraum	66
4.4.1 Lüftungskonzepte für den Technikraum	66
4.4.2 Stromverbrauch der Luftförderung	68
4.4.3 Zulufttemperatur bei mechanischer Kühlung und Entfeuchtung	71
4.4.4 Umschaltpunkt Free Cooling – Mechanische Kühlung	72
4.4.5 Nutzen von Nachtauskühlung	74
4.5 Regelung der Lüftungs- und Kälteanlage	76
4.5.1 Verhalten der bestehenden Regelung	76
4.5.1 Optimierte Regelung	78
4.6 Deckung des Eigenbedarfs mit Photovoltaik	86
4.6.1 Dach- und Fassadenanlagen	86
4.6.2 Nutzen von Batteriespeichern	88





5.	ANHÄNGE	91
5.1	Arbeitspakete	91
5.2	Zeitplan	92





Liste der Abkürzungen

BTG	Bahntechnikgebäude
EER	Energy Efficiency Ratio, Energieeffizienz einer Kältemaschine
HLK	Heizung, Lüftung, Klima
HV	Hauptverteilung (Strom)
RhB	Rhätische Bahn
SA	Sicherungsanlagen
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung





EXECUTIVE SUMMARY (D)

Dieser Leitfaden besteht aus Empfehlungen zur Identifizierung und Realisierung von Effizienzpotentialen am Bahntechnikgebäude (BTG). Hauptansatzpunkte sind die Optimierung der Gebäudehülle, eine angemessene Dimensionierung der Lüftungs- und Klimakälteanlagen, deren optimale Regelung und die Eigenversorgung mit Photovoltaikstrom. Die Erkenntnisse lassen sich auch für andere Technikräume ohne ständige Arbeitsplätze nutzen.

Die Analysen wurden mittels zeitlich hochauflösender, thermischer Simulationen an einem standardisierten BTG der SBB durchgeführt. Es wurden verschiedene Massnahmen zur Effizienzverbesserung modelliert und deren Einsparungen untersucht.

Heutige Lüftungs- und Klimakälteanlagen in BTG werden mangels Daten zum effektiven Abwärmeeintrag im Betrieb häufig mit grossen Reserven ausgelegt, was zu ineffizientem Taktbetrieb führt. Eine suboptimale Luftmengenregelung führt zusätzlich zu unnötigem Luftwechsel und damit erhöhtem Ventilatorstrombedarf. Einfluss haben auch die Raumsollwerte: Eine Senkung der Raumsolltemperatur von 28 °C auf 22 °C entspricht in etwa einer Verdoppelung des Strombedarfs für Lüftung und Kühlung.

Es wurden Ansatzpunkte für eine verbesserte Auslegung anhand von Lastgangprofilen an der USV realer BTG abgeleitet. Darüber hinaus wurden optimierte Regelalgorithmen für die Lüftungs- und Kälteanlagen entwickelt, welche dem Technikraum genau die zum jeweiligen Zeitpunkt benötigte Kälteleistung in demjenigen Modus zuführt, der bei den herrschenden Bedingungen am effizientesten arbeitet. Die Lösung lässt sich voraussichtlich auch im Bestand umsetzen, da keine zusätzlichen Sensoren oder Aktoren benötigt werden.

Bei der Optimierung der Gebäudehülle zeigte sich, dass standortunabhängig der gleiche Grundsatz gilt: «So wenig Wärmedämmung wie möglich, so viel wie nötig». Eine grosse thermische Speichermasse oder deren aktive Bewirtschaftung mittels Nachtauskühlung sind hingegen nicht zielführend. Die solaren Wärmeinträge über die fensterlose Hülle sind sehr gering.

BTG sind aufgrund der konstanten Bandlast attraktive Objekte für die Eigenversorgung mit PV-Strom. Dachanlagen sind unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich attraktiv, Batterien und Fassadenanlagen nicht. Da aber eine wirtschaftliche Optimierung pro Objekt nicht zur kosteneffizientesten Gesamtlösung führen muss, sollten auch übergeordnete Ziele Berücksichtigung finden.



EXECUTIVE SUMMARY (F)

Ce guide contient des recommandations pour l'identification et la réalisation des potentiels d'efficacité des bâtiments ferroviaires. Les principaux points de départ sont l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, un dimensionnement adapté des installations de ventilation et de climatisation, leur régulation optimale et une alimentation autosuffisante en électricité d'origine photovoltaïque. Les résultats peuvent aussi être utilisés pour d'autres locaux techniques dépourvus de postes de travail permanents.

Les analyses ont été réalisées au moyen de simulations thermiques à haute résolution temporelle sur un bâtiment ferroviaire normalisé des CFF. Différentes mesures d'amélioration de l'efficacité ont été modélisées et leurs économies ont été analysées.

Les installations actuelles de ventilation et de climatisation dans les bâtiments ferroviaires sont, en raison d'un manque de données sur les rejets de chaleur effectifs pendant l'exploitation, souvent conçues avec des réserves importantes, ce qui aboutit à un fonctionnement cyclique inefficace. Une régulation non optimale du volume d'air entraîne par ailleurs un renouvellement d'air inutile et donc des besoins en électricité accrus pour les ventilateurs. Les valeurs ambiantes de consigne jouent aussi un rôle: un abaissement de la température ambiante de consigne de 28 °C à 22 °C correspond pratiquement à un doublement des besoins en électricité pour la ventilation et le refroidissement.

Les profils de charge de l'ASI de bâtiments ferroviaires réels ont servi de points de départ à une amélioration de la conception. D'autre part, des algorithmes de régulation optimisés ont été développés pour les installations de ventilation et de climatisation, afin de fournir au local technique la puissance frigorifique nécessaire à un instant donné, dans le mode le plus efficace par rapport aux conditions présentes. Une mise en œuvre de la solution dans le parc existant est envisageable, dans la mesure où elle ne requiert aucun capteur ni actionneur supplémentaire.

Concernant l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, l'applicabilité du principe suivant a été montrée, indépendamment du lieu: «une isolation thermique réduite au strict nécessaire». Une masse de stockage thermique importante ou sa gestion active au moyen d'un refroidissement nocturne ne sont, en revanche, pas appropriées. Les apports thermiques d'origine solaire à travers l'enveloppe sans fenêtres sont minimales.

Les bâtiments ferroviaires, du fait de la charge de base constante, se prêtent bien à une alimentation autosuffisante en électricité photovoltaïque. Les installations en toiture, dans les conditions générales actuelles, présentent un intérêt économique, contrairement aux batteries et aux installations en façade. Toutefois, dans la mesure où une optimisation économique de chaque ouvrage n'aboutit pas nécessairement à la solution globale la plus rentable, les objectifs prioritaires doivent aussi être pris en compte.



EXECUTIVE SUMMARY (E)

This guideline consists of recommendations for identifying and realising potential efficiency gains in rail engineering buildings (German abbreviation: BTG, for “Bahntechnikgebäude”). The main starting points are the optimisation of the building envelope, appropriate dimensioning of the ventilation and air-conditioning/cooling systems, their optimal control, and self-sufficient provision of photovoltaic power. The findings can also be adopted for other technical equipment spaces not featuring permanent workplaces.

The analyses were carried out using high-time-resolution thermal simulations for a standardised BTG at SBB. Various efficiency-enhancing measures were modelled and their savings examined.

Present-day ventilation and air conditioning/cooling systems in BTGs are often designed with large amounts of reserve capacity due to a lack of data on effective waste-heat generation during operation, thus resulting in inefficient cyclic operation. Suboptimal air-volume control additionally results in unnecessary air exchange and thus increases ventilation-related electricity consumption. The room setpoints also have an influence: a reduction of the target room temperature from 28 °C to 22 °C means approximately doubling the power requirement for ventilation and cooling.

The basis for an improved design was derived from the load profiles for the UPS systems of actual BTGs. In addition, optimised control algorithms for the ventilation and cooling systems were developed which supply the technical equipment room with the precise cooling capacity required at any given time in the mode that works most efficiently under the prevailing conditions. The solution can probably also be implemented in existing buildings, as no additional sensors or actuators are required.

Optimisation of the building envelope showed that the same principle applies regardless of location – namely: “As little heat insulation as possible, and as much as necessary.” However, a large thermal storage mass or its active management by means of night cooling does not fit the purpose. Solar heat input through the windowless envelope is very low.

Due to their constant baseload requirement, BTGs are conducive to a self-sufficient PV power supply. Under the current conditions, roof-mounted systems are economically attractive whereas batteries and façade-mounted systems are not. However, since the economic optimisation of each location does not necessarily result in the most cost-effective overall solution, higher-level objectives should also be taken into account.

ZUSAMMENFASSUNG (D)

Herausforderung: Energieeffizienz am Bahntechnikgebäude

Neben der eigentlichen Beförderung von Personen und Gütern sind Bahntechnikgebäude (BTG) gewichtige Nebenenergieverbraucher. BTG sind Technikgebäude ohne dauernde Personenanwesenheit, welche häufig Stellwerke, Telekommunikations- und Sicherungsanlagen beinhalten. Sie sind in der Regel mit Batterien und unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV) sowie mit mechanischer Lüftung und aktiver Kühlung ausgestattet. Die Herausforderung liegt darin, die BTG so zu gestalten, dass diese mit möglichst wenig Energieaufwand ihre Funktion zuverlässig erfüllen können.

Dieser Leitfaden besteht aus Empfehlungen zur Identifizierung und Realisierung von Effizienzpotentialen am BTG. Hauptansatzpunkte sind die Optimierung der Gebäudehülle, eine angemessene Dimensionierung der Lüftungs- und Klimakalteanlagen, deren optimale Regelung und die Eigenversorgung mit Photovoltaikstrom. Der Fokus liegt auf weit verbreiteten, standardisierten BTG, die Erkenntnisse sind aber generell relevant für Technikräume ohne ständige Arbeitsplätze.

In der Planung und Realisierung von BTG sollten bestehende Vorgehensweisen hinterfragt werden. Verschiedene Organisationseinheiten und Interessen sind tangiert. Im Rahmen einer begleitenden Masterarbeit¹ wurden die Bedingungen für eine erfolgreiche Implementierung des Leitfadens am Beispiel der SBB untersucht. Es zeigte sich, dass eine erfolgreiche Umsetzung in der Praxis eine Verankerung auf normativer, strategischer und operativer Ebene im Unternehmen erfordert.

Thermische Simulationen mit vielen Freiheitsgraden

Die vorliegenden Analysen wurden mittels zeitlich hochauflösender, thermischer Simulationen mit EnergyPlus durchgeführt. Dadurch standen einem initialen Aufwand zur Modellierung des Referenzgebäudes fast unbeschränkte Freiheitsgrade zur Verfügung.

Als Referenz wurde ein BTG der SBB in Premoco-Elementbauweise aus Stahlbeton mit 5 cm Innenwärmedämmung und 122 m² Nettogeschossfläche modelliert (Abbildung 1). Die maximale Luftmenge liegt bei einem 9.5-fachen Luftwechsel pro Stunde, die installierte, mechanische Kälteleistung bei knapp 200 W/m². Es liegen gemessene Lastverläufe des Stromverbrauchs an der Hauptverteilung sowie an der USV der Sicherungsanlagen (SA) vor. Der Stromverbrauch ab 50-Hz-Netz im Jahr 2018 betrug 53'060 kWh.

Es wurden verschiedene Rechenmodelle evaluiert und validiert. Modelle mit vereinfachter Betrachtung der thermischen Speichermasse nach SIA 2044:2011 führten bei wenig oder nicht gedämmten Bauweisen zu systematischen Tempe-

¹ Masterarbeit von Mario Nikolic, Quaderstrasse 1, 7205 Zizers, zur Erlangung des Executive Master of Business Administration FH, eingereicht am 24. Juli 2019 bei der Kalaidos Fachhochschule Schweiz. Arbeit nicht öffentlich zugänglich.

■

raturabweichungen und sollten nicht für die Dimensionierung der Wärmedämmung eingesetzt werden. Für vergleichende Untersuchungen sind diese Modelle aber anwendbar.



Abbildung 1: Aussenansicht des modellierten BTG-Typus «Netstal» in der Realität.

Reale Abwärmelasten als Basis für die Auslegung der Gebäudetechnik

Basis für die Auslegung der Lüftung und Kühlung im BTG sind Kenntnisse über die internen Abwärmelasten. Elektrische Anschlussleistungen von Komponenten im BTG sagen wenig über die effektive Abwärmelast im Betrieb aus. Im Rahmen dieses Projekts wurden gemessene, elektrische Bezugsleistungen realer BTG ausgewertet.

Über den Netzanschluss eines BTG laufend häufig externe Verbraucher wie Beleuchtung, Kundeninformationssysteme oder Signale und Barrieren nahe gelegener Bahnhöfe. Diese externen Verbraucher generieren keine Abwärme im BTG und sind für die Auslegung der HLK-Anlagen abzugrenzen. Die Analyse zeigt, dass die nachts auftretende Bandlast an der USV der Sicherungsanlagen die beste, verfügbare Annäherung an die effektiven, innerhalb der Gebäudehülle des BTG anfallenden Abwärmelasten darstellt. Der Verbrauch innerhalb der Gebäudehülle des BTG fällt als konstante Bandlast an.

Die untersuchten Lüftungs- und Klimakälteanlagen waren (unter Ausnahme einzelner Altbauten) deutlich zu gross dimensioniert. Bei acht untersuchten Objekten lag die elektrische Bandlast zwischen 25 und 65 W/m², installiert waren zwischen 83 und 197 W/m² an Kälteleistung (Abbildung 2). Die Gründe für die Überdimensionierung werden in den folgenden Bereichen vermutet:

- Richtwerte² für die zu installierende, spezifische Kälteleistung von 50-200 W/m²

² Regelwerk SBB, I-50200, Gebäude für Bahntechnik: Raumkonditionen und Kühlleistungen. Internes Dokument, gültig ab 1.8.2017

- Einbezug von Flächenreserven bei der Dimensionierung für einen späteren Stellwerkersatz im laufenden Betrieb
- Verwendung von für den Abwärmefall im Regelbetrieb nicht aussagekräftigen (Anschluss-) Leistungen der verbauten Komponenten.

Die solaren Wärmeeinträge sind im Vergleich zu den internen Abwärmelasten nicht gross. Bei allen geprüften Bauweisen, welche im Winter nicht zu Frost führen, liegen die solaren Einträge bei fensterlosen Technikräumen unter 6 W pro m² Nettogeschossfläche (Klima Lugano), dies im Gegensatz zu den vorgefundenen internen Lasten von 26.5 W/m² bis 147 W/m².

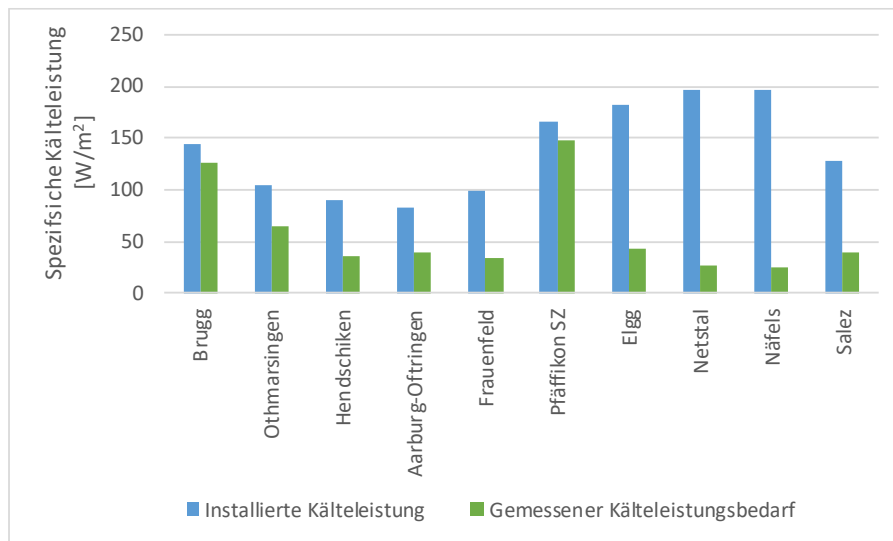


Abbildung 2: Installierte vs. angeforderte Kälteleistung bei zehn BTG. Der gemessene Kälteleistungsbedarf wurde anhand der elektrischen Bandlast am Abgang der USV der Sicherungsanlagen bestimmt.

Alles zusammen führte im betrachteten BTG «Netstal» zu einer rund 7-fachen Überdimensionierung der Kälteleistung, was zu einem energetisch ungünstigen Taktbetrieb führt. Ist die Lüftungsanlage im Verhältnis zum Kältebedarf viel zu gross dimensioniert, wird die Lüftung selbst beim maximal auftretenden Lastfall takten, weil dieser Lastfall unter der Regelgrenze der Lüftungsantriebe und Kältekompressoren von rund 30% liegt.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollten bei der Anpassung der Regelwerke und bei zukünftigen Auslegungen der Lüftungs- und Klimaanlage von BTG berücksichtigt werden. Neben den hiergewonnenen Daten zu realen Abwärmelasten könnten auch gemeinsam mit den Herstellern realitätsnahe Kennwerte für Stellwerkkomponenten, Telekomanlagen etc. im Regelbetrieb erarbeitet werden. Flächenreserven müssen nicht einbezogen werden, wenn im Fall eines parallelen Betriebs von zwei Stellwerken eine mobile Kälteversorgung eingesetzt wird.

Die Raumanforderungen bestimmen die Effizienz mit

Die Höhe der Raumsolltemperatur ist massgeblich für den Energiebedarf von Lüftung und Kühlung im BTG. Eine Senkung der Raumsolltemperatur von 28 °C auf 22 °C ergibt einen rund doppelten Strombedarf für Lüftung und Klimakälte.

Bestehende Vorgaben zu einem minimalen Luftwechsel im BTG sind zu hinterfragen. Ein einfacher Luftwechsel pro Stunde, wie er z.B. bei den SBB² vorgegeben ist, entspricht in etwa dem hygienischen Luftwechsel in einem Büro. Es konnte nicht geklärt werden, warum in einem Raum ohne ständige Arbeitsplätze ein so hoher Luftwechsel nötig ist. Für die Abführung von Ausgasungen aus Bleibatterien³ oder anderer Schadstoffausdünstungen würden deutlich geringere Luftmengen genügen.

Gratiskühlung über eine optimierte Gebäudehülle

Die Wärmedämmung und die thermische Speichermasse der Gebäudehülle eines BTG sollten so optimiert werden, dass es im Winter nicht zu kalt wird und im Sommer möglichst viel Wärme passiv abfliesst. Es gilt die Faustregel: «So wenig Wärmedämmung wie möglich, so viel wie nötig (Frostschutz)».

Dieser Grundsatz gilt für alle Bauweisen, Materialisierungen und Standorte. Beim Betonbau und beim Holzleichtbau braucht es zur Sicherstellung des Frostschutzes im Winter rund 5 cm Wärmedämmung. Ob die Dämmung innen oder aussen angebracht wird, spielt für den Energiebedarf keine Rolle. Beim massiven Holzbau braucht es an der Fassade keine zusätzliche Dämmung. Der energetisch optimale U-Wert aller Konstruktionen gegen Aussenklima liegt bei ca. 0.5 W/m²K.

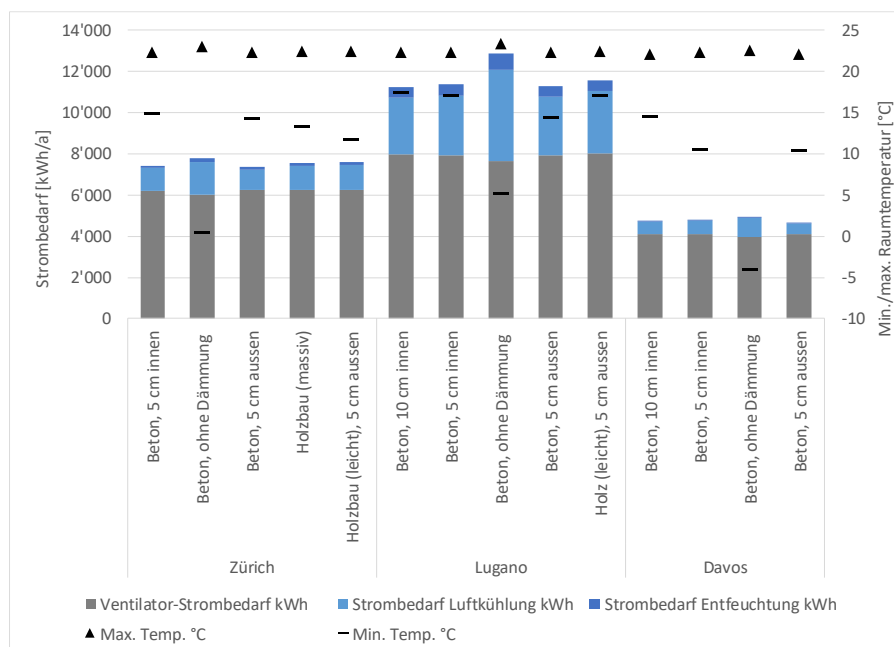


Abbildung 3: Stromverbrauch für Lüftung und Kühlung an verschiedenen Standorten und unterschiedlichen Konstruktionen (Betonbau und Holzmassivbau).

Eine hohe thermische Speichermasse oder deren «Bewirtschaftung» mit Nachtauskühlung sind beim BTG nicht zielführend. Über das gesamte Jahr braucht ein Holzleichtbau trotz viel geringerer, thermischer Speichermasse nur wenig mehr Strom für die Lüftung und Kühlung als der Betonbau (Abbildung 3), und eine

³ Lithium-Ionen- und Salzbatterien entschärfen dieses Problem zukünftig vollständig.

■

Nachtauskühlung führt insgesamt zu einem deutlichen Mehrverbrauch (Abbildung 47 auf Seite 75).

Bei der Dimensionierung der Dämmung muss nicht nach dem Standort differenziert werden. Eine Gebäudehülle mit einem U-Wert von rund 0.5 W/m²K ist an allen Standorten ein sehr guter Kompromiss (Abbildung 3). Ungedämmte Beton- oder Holzleichtbauten führen hingegen zu Frostgefahr und sind auch energetisch nicht optimal.

Prinzipien der Lüftung und Kühlung im Technikraum

Ein ausschliesslich auf Free Cooling (Kühlung mit Aussenluft) basierendes Konzept ist für ein BTG nur in alpinen Standorten mit geringen, flächenspezifischen Abwärmelasten und einer hohen, tolerierten Raumlufttemperatur möglich, in diesem Fall aber sehr effizient. Im Mittelland und mit typischen Abwärmelasten hat ein System mit Monoblock und direkter Aussenluftkühlung gegenüber einem Umluftkühlgerät (mit direktem oder indirektem Free Cooling) energetische Vorteile, weil weniger Wärmeübergänge überwunden werden müssen und somit während mehr Zeit pro Jahr Free Cooling möglich ist.

Der Lüftungsmonoblock sollte mit Umluftschaltung ausgerüstet sein, damit im Sommer bei einer Aussenlufttemperatur über der Raumtemperatur auf Umluftbetrieb gewechselt werden kann. Der am Beispielobjekt vorgefundene, minimale Aussenluftanteil von 25 % entspricht einem mehr als zweifachen Luftwechsel pro Stunde und ist sehr hoch zur Sicherstellung einer minimalen Luftqualität resp. für die Abführung von Batterieausgasungen.

Der Anteil der Luftförderung am Energiebedarf für die Lüftung und Kühlung im BTG ist sehr gross. Der Strombedarf der Luftförderung steigt in dritter Potenz zur bewegten Luftmenge. Ein gleichmässig zwischen 0 % und 100 % taktender Ventilator verbraucht über die Zeit rund doppelt so viel Strom wie einer, der konstant auf 50 % läuft, obwohl am Ende gleich viel Luft bewegt wurde. Ein regelmässiger Betrieb hat gegenüber einem taktenden Betrieb energetisch grosse Vorteile.

Der maximal notwendige Luftwechsel ergibt sich bei einer gegebenen Abwärmelast und einer gegebenen Temperaturdifferenz dT zwischen Raumsoll- und Zulufttemperatur näherungsweise gemäss der Formel 1.

$$\text{Luftwechsel [h}^{-1}\text{]} = \frac{(\text{Spez. Abwärmelast } [\frac{\text{W}}{\text{m}^2}] + \text{Solare Last } [\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]) * 3.6 [\frac{\text{kJ}}{\text{Wh}}]}{\text{Raumhöhe [m]} * dT [\text{K}] * c_p [\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}] * \rho [\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]}$$

Formel 1: Berechnung des notwendigen Luftwechsels bei gegebener Wärmelast, Raumhöhe und Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumsolltemperatur.

Die solaren Wärmeeinträge sind im Vergleich zu den vorgefundenen, typischen Abwärmelasten von 26 – 65 W/m² sehr gering. Beim BTG als fensterloser Betonbau mit 5 cm Innendämmung am Standort Zürich betragen sie in der heissesten Sommerwoche nur rund 3 W pro m² Nettogeschossfläche.

■

Die Zulufttemperatur im Betriebszustand mit mechanischer Kühlung liegt im Optimalfall rund 7-10 K unter der Raumsolltemperatur. Tiefer Zulufttemperaturen führen zu unerwünschter, im Raum nicht nutzbarer Entfeuchtung der Zuluft, kleinere Differenzen zu stark erhöhtem Strombedarf für die Luftförderung.

Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und Raumsolltemperatur ist, desto mehr Luft muss beim Free Cooling zur Erreichung einer gegebenen Kälteleistung umgewälzt werden. Somit hat auch der Umschaltpunkt zwischen Free Cooling und mechanischer Kühlung ein Optimum. Ab rund 4 K Temperaturdifferenz zwischen der Aussenluft und dem Raumklima ist die freie Kühlung über Aussenluft effizienter als der Einsatz der mechanischen Kühlung.

Grosses Sparpotenzial durch optimierte Regelung der Anlagen

Bei den analysierten BTG wird die ventilatorgestützte Luftmenge beim Free Cooling in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Aussenklima geregelt. Diese Temperaturdifferenz ist jedoch kein guter Sollwertgeber: Die Aussentemperatur korreliert bei Räumen mit hohen internen Lasten nur ungenügend mit dem Kältebedarf, weil die solaren Lasten nur einen kleinen Teil der Einträge ausmachen. Weiterhin wird im Betriebsmodus mit mechanischer Kälte auf eine fixe Zulufttemperatur bei konstant 100 % Luftmenge geregelt und die Kältemaschine schaltet bei einer fixen Raumtemperatur ein, unabhängig davon, ob der dann bestehende Kältebedarf noch mit Free Cooling gedeckt werden könnte. Die bestehende Regelung «kennt» den effektiven Kältebedarf des Raumes nicht und kann die Luftmenge und den Betriebsmodus nicht optimal steuern. Dies führt in der Praxis, insbesondere bei zu gross dimensionierten Anlagen, zu starkem Takten, unnötiger Luftumwälzung und hohem Strombedarf für die Ventilatoren.

Grosses Sparpotenzial verspricht eine mittels PID-Regler nach dem effektiven Kältebedarf des Raumes geführte Regelung⁴. Der Kältebedarf im BTG ist allerdings nicht direkt messbar, sondern er muss über eine iterative Messung der Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert laufend angenähert werden. Der optimierte Regler führt folgenden Regelzyklus aus:

1. Messung der Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert.
2. Berechnung des Stellwerts für den zu deckenden Kältebedarf aus der Regelabweichung, dem Integral der Regelabweichung und ggf. der Differenz der Regelabweichung zum letzten Zeitschritt (PID-Regler).
3. Berechnung der maximal möglichen Kälteleistung über Free Cooling, mechanische Kühlung und im Umluftkühlmodus bei 100 % Luftmenge und den gegebenen Temperaturen und Vorgaben.
4. Entscheidung, welcher Modus gewählt wird aufgrund dessen Eignung zur Deckung des Bedarfs und dessen Effizienz (1. Priorität «Free Cooling» mit Aussenluft, 2. Priorität «Mechanische Kühlung»).
5. Berechnung der im gewählten Modus nötigen Luftmenge als Verhältnis zwischen maximal möglicher Kälteleistung (Schritt 3) und der Kälteanforderung (Schritt 2), Ermittlung des ggf. nötigen Umluftanteils bei zu

⁴ Ein PID-Regler ist ein Regelkreismechanismus mit Rückkopplung, welcher eine Stellgrösse aufgrund der laufenden Messung einer Regelabweichung fortlaufend anpasst.

tiefen Aussenlufttemperaturen oder einer Enthalpie der Aussenluft über derjenigen der Raumluft.

6. Zurück zu Schritt 1

Die Stromeinsparung durch die optimierte Lüftungs- und Kälterege lung im BTG⁵ betragen je nach Randbedingungen zwischen 0 % und über 50 % und kommen primär dadurch zustande, dass weniger unnötige Luft umgewälzt wird (Abbildung 4). Die grössten Einsparungen bringt die optimierte Regelung bei überdimensionierten Anlagen, wie sie in der Praxis vorkommen. Der optimierte Regler hält bei hohen Lasten zudem die Solltemperatur besser ein.

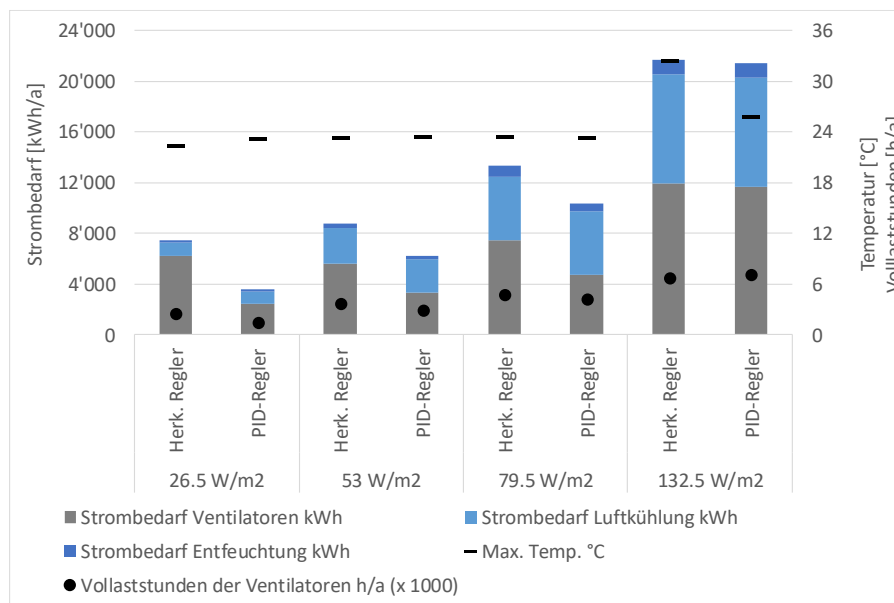


Abbildung 4: Stromverbrauch für die Lüftung und Kühlung im BTG bei unterschiedlichen Regelungen und internen Lasten.

Tabelle 1: Weitere Vergleichsgrössen zwischen herkömmlichem und PID-Regler bei verschiedenen internen Lasten.

Interne Last	Regler	PUE	Stromeinsparung	Reduktion Maschinenstarts
W/m ²				
26.5	Herk. Regler	1.36		
	PID-Regler	1.14	-52%	-34%
53	Herk. Regler	1.18		
	PID-Regler	1.12	-30%	-99%
79.5	Herk. Regler	1.19		
	PID-Regler	1.14	-23%	-100%
132.5	Herk. Regler	1.18		
	PID-Regler	1.18	-1%	-89%

⁵ Betonbau mit 5 cm Innendämmung, 0.15-fache Infiltration, Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 9.5-facher Luftwechsel, Zulufttemperatur 12 °C bei mech. Kühlung, minimal 5 °C Zulufttemperatur im Winter. Bestehende Regelung: Free Cooling ab 18.5 °C Raumtemperatur und mech. Kühlung ab 21.5 °C.

Zusätzlich wird der Taktbedarf des Kompressors deutlich reduziert und die Abhängigkeit der Effizienz der Kühlung (ausgedrückt als PUE⁶) ist nicht mehr von der Höhe der internen Last abhängig (Tabelle 1).

Die entwickelte Regelstrategie lässt sich prinzipiell auch im Bestand umsetzen, da weder zusätzliche Sensorik noch Aktoren benötigt werden.

Deckung des Eigenbedarfs mit Photovoltaik

BTG sind aufgrund des konstanten Stromlastprofils attraktive Objekte für eine Ausrüstung mit Photovoltaik. Es wurden Varianten an Dach- und Fassadenanlagen mit und ohne Batteriespeicher geprüft und deren Deckungscharakteristik und Wirtschaftlichkeit verglichen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Variantenstudie zur Stromproduktion am Standort des BTG.

		Variante 1a	Variante 1b Süd-, Ost- & Westfassade	Variante 1c	Variante 1d	Variante 2 Dach	Variante 3 Süd-, Ostfassade
Anzahl Module (à 1.63 m ²)	Stck.		84			44	68
Installierte Leistung (327 Wp pro Modul)	kWp		27.5			14.4	22.2
Batteriekapazität	kWh	-	7.7	15.4	23.1	-	-
Jährlicher Ertrag der PV-Anlage	kWh/a		19'587			13'540	16'476
Ertrag pro kWp installierter Leistung	kWh/kWp		713			941	741
Eigenverbrauchsanteil PV		60%	71%	79%	85%	73%	64%
Netzeinspeisung PV-Strom		40%	29%	21%	15%	27%	36%
Autarkiegrad PV		22%	26%	29%	31%	19%	20%
Netzbezug		78%	74%	71%	69%	81%	80%
Jahresbilanz PV-Anteil			37%			26%	31%
Jährlicher Ertrag (Eigenverbrauch, Einspeisung)	CHF/a	2'225	2'418	2'561	2'670	1'701	1'930
Kapitalkosten	CHF/a	4'008	4'911	5'453	5'904	1'468	3'293
Jahreskosten	CHF/a	1'784	2'493	2'892	3'234	-234	1'363

Unter den hinzugezogenen Randbedingungen weist nur die Dachanlage ohne Batterie eine vorteilhafte Wirtschaftlichkeit auf (Tabelle 2). Alle Varianten führen auch ohne Batterie zu mindestens 60 % Eigenverbrauch. Die Steigerung des Eigenverbrauchs durch Batterien rechtfertigt deren Investition nicht, und auch die Mehrinvestitionen einer Fassadenanlage stehen in einem ungünstigen Verhältnis zum Mehrertrag, obwohl sie mehr «wertvollen» Winterstrom liefert.

Die heutigen Randbedingungen⁷ im Energiebereich führen ohne Gewichtung anderer Faktoren (wie Vorzeigecharakter, Beitrag zu übergeordneten Zielen) zu einer wirtschaftlichen Optimierung von Einzelanlagen und damit zu vielen, aber kleinen Anlagen. Für die Erreichung des übergeordneten Ziels, den Anteil an erneuerbarem Strom im Netz kosteneffizient zu steigern, ist dies vermutlich nicht die optimale Lösung, denn viele kleine Anlagen sind insgesamt teurer als wenige grosse. Da die jetzigen Anreizstrukturen auch nicht in Stein gemeisselt sind, sollte die individuelle Wirtschaftlichkeit jeder Einzelanlage nicht zu stark gewichtet werden.

⁶ PUE = Power Usage Effectiveness

⁷ Investitionskosten, Strombezugstarife, Einspeisevergütungen

Die wichtigsten Planungsgrundsätze

Auslegung der Lüftungs- und Kälteanlagen

- Für Technikräume ohne besondere Anforderungen bietet sich aus energetischer Sicht ein **Kühlkonzept mit direkter Nutzung von Aussenluft (direktes Free Cooling)** an. Die Stunden pro Jahr mit nutzbarem Free Cooling sind damit gegenüber einer Umluftkühlung mit indirektem Free Cooling höher.
- Die Auslegung der Lüftungs- und Klimaanlage im BTG sollte zukünftig noch besser an den effektiven Kältebedarf angepasst werden. **Zu gross dimensionierte Anlagen führen zu ineffizientem Taktbetrieb.** Der Strombedarf der Luftförderung steigt in dritter Potenz zur bewegten Luftmenge und ist im BTG der Haupttreiber des Energiebedarfs für Lüftung und Kühlung. Ein regelmässig zwischen 0 % und 100 % taktender Ventilator verbraucht über die Zeit rund doppelt so viel Strom wie einer, der konstant auf 50 % läuft, obwohl am Ende gleich viel Luft bewegt wurde.
- **Flächenreserven sollten bei der Auslegung der HLK-Anlagen nicht berücksichtigt werden** (ggf. mobile Kälte vorsehen) und es sind realistische Kennwerte für die effektiv zu erwartenden Abwärmelasten zu verwenden. Anschlussleistungen sind dazu nicht geeignet, **die Bandlast ab USV der Sicherungsanlagen hat sich als guter Indikator für die innerhalb des BTG anfallende Abwärme im realen Betrieb herausgestellt.** Die interne Abwärmelast ist ganzjährig sehr konstant und die solaren Einträge sind bei fensterlosen Räumen im Gegensatz zu den internen Abwärmern gering.
- Um **für künftige Anlagendimensionierungen eine bessere Datengrundlage** zur Verfügung zu haben, können einerseits mit den Komponentenlieferanten realistische Abwärmelasten im Betrieb ermittelt werden, andererseits kann der Strombezug exemplarischer BTG unter realer Last gemessen werden. Zum Verständnis der realen, internen Lasten schlagen wir vor, den elektrischen Lastgang am Abgang der USV der Sicherungsanlagen zu messen und zu speichern.
- Die **Sollwerte für die Raumtemperatur im BTG beeinflussen den Energiebedarf sehr stark.** Eine Senkung der Raumsolltemperatur von 28 °C auf 22 °C entspricht in etwa einer Verdoppelung des Strombedarfs für Lüftung und Kühlung. Die Bestrebungen zur Verbesserung der Energieeffizienz stehen in Konkurrenz zu einer längeren Lebensdauer elektronischer Komponenten bei tieferen Umgebungstemperaturen.
- Der **maximal notwendige Luftwechsel für die Kühlung** ergibt sich bei gegebener Abwärmelast und Temperaturdifferenz dT zwischen Raumsoll- und Zulufttemperatur näherungsweise gemäss folgender Formel:

$$\text{Luftwechsel [h}^{-1}\text{]} = \frac{(\text{Spez. Abwärmelast } [\frac{\text{W}}{\text{m}^2}] + \text{Solare Last } [\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]) * 3.6 [\frac{\text{kJ}}{\text{Wh}}]}{\text{Raumhöhe [m]} * dT [\text{K}] * c_p [\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}] * \rho [\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]}$$

Die solaren Wärmeeinträge sind im Vergleich zu den typischen Abwärmelasten sehr gering (ca. 3-5 W/m² Nettogeschossfläche). Die Zulufttemperatur bei mechanischer Kühlung liegt optimal 7-10 K unter der Raumsolltemperatur. Tiefer Zulufttemperaturen führen zu unnützer

■

Entfeuchtung, kleinere Differenzen zu stark erhöhtem Strombedarf für die Luftförderung.

Optimierung der Gebäudehülle

- Es gilt die Faustregel: **«So wenig Wärmedämmung wie möglich, so viel wie nötig (Frostschutz)»**. Dieser Grundsatz gilt für alle Bauweisen, Materialisierungen und Standorte. Der energetisch optimale U-Wert aller Konstruktionen gegen Aussenklima liegt bei ca. $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Möglich sind somit leicht gedämmte Beton- oder Holzleichtbauten oder ungedämmte Holzmassivbauten.
- Eine **hohe thermische Speichermasse ist beim BTG nicht nützlich** und eine aktive Nachtauskühlung über die Lüftung sogar kontraproduktiv.

Regelung der Lüftungs- und Kälteanlage

- Eine nach Kältebedarf resp. nach Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert regelnde Steuerung der Lüftungs- und Kälteanlagen bringt Energieeinsparungen für Lüftung und Kühlung von bis zu 50 %. Dazu sind PID-Regler geeignet, welche laufend die Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert messen und daraus ermitteln, ob die Kältelieferung erhöht oder reduziert werden soll.
- Generell liegen die Einsparungen durch eine optimierte Regelung vor allem in der **Reduktion unnötigen Luftwechsels**. Die Luftmenge sollte gemäss dem Kältebedarf geregelt werden, und nicht nach Raum- und Aussentemperatur. Auch bei mechanischer Kälte sollte die Luftmenge variabel sein.
- **Minimale Luftwechselraten, ein minimaler Aussenluftanteil im Umluftbetrieb oder eine periodische Spülung** sind unter Berücksichtigung konkreter Anforderungen (z.B. Ausgasungen von Bleibatterien) bedarfsgerecht festzulegen. Pauschale Vorgaben wie ein 1-facher Luftwechsel pro Stunde führen zu sehr hohem, unnötigem Stromverbrauch der Lüftungsantriebe.
- Der **Wechsel von Free Cooling zu mechanischer Kühlung** erfolgt bei ca. 4 K Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und Raumsolltemperatur. Bei kleineren Temperaturdifferenzen ist die mechanische Kühlung effizienter.

Photovoltaik am Standort des BTG

- BTG sind aufgrund des konstanten Stromlastprofils **attraktive Objekte für eine Ausrüstung mit Photovoltaik**.
- Bei den gegenwärtigen Anreizstrukturen ist die Ausrüstung mit **Dachanlagen wirtschaftlich attraktiv**; Batterien und Fassadenanlagen sind rein wirtschaftlich wenig attraktiv.
- Eine **wirtschaftliche Optimierung pro Objekt führt nicht notwendigerweise zur kosteneffizientesten Erreichung von übergeordneten Zielen**.

RÉSUMÉ (F)

Défi: l'efficacité énergétique dans les bâtiments ferroviaires

Outre le transport proprement dit des personnes et des marchandises, les bâtiments ferroviaires sont d'importants consommateurs d'énergie secondaires. Ces bâtiments techniques n'ont pas une présence humaine permanente et contiennent fréquemment des postes d'enclenchement, ainsi que des installations de télécommunication et de sécurité. Ils sont généralement équipés de batteries et d'une alimentation sans interruption (ASI), ainsi que d'une ventilation mécanique et d'un système de refroidissement actif. Le défi consiste à aménager les bâtiments ferroviaires de telle sorte qu'ils puissent assurer leur fonction avec fiabilité, tout en ayant la consommation énergétique la plus faible possible.

Ce guide contient des recommandations pour l'identification et la réalisation des potentiels d'efficacité des bâtiments ferroviaires. Les principaux points de départ sont l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, un dimensionnement adapté des installations de ventilation et de climatisation, leur régulation optimale et une alimentation autosuffisante en électricité d'origine photovoltaïque. L'accent est mis sur les bâtiments ferroviaires normalisés les plus répandus, mais les résultats peuvent aussi s'appliquer de manière générale à d'autres locaux techniques dépourvus de postes de travail permanents.

Lors de la planification et de la réalisation des bâtiments ferroviaires, il convient de s'interroger sur les procédures existantes. Différentes unités organisationnelles et différents intérêts sont concernés. Dans le cadre d'un mémoire de master⁸, l'applicabilité du guide dans la pratique a été examinée en prenant l'exemple des CFF. Il est apparu qu'une mise en œuvre réussie dans la pratique nécessite un ancrage normatif, stratégique et opérationnel dans l'entreprise.

Simulations thermiques avec de nombreux degrés de liberté

Les présentes analyses ont été réalisées au moyen de simulations thermiques à haute résolution temporelle avec EnergyPlus. Cela a permis de disposer de degrés de liberté quasiment illimités pour un travail initial de modélisation du bâtiment de référence.

Aux fins de référence, la modélisation a porté sur un bâtiment ferroviaire des CFF à structure modulaire Premoco en béton armé, présentant une isolation thermique intérieure de 5 cm et une surface de plancher nette de 122 m² (Illustration 5). La quantité d'air maximale représente 9.5 renouvellements d'air par heure et la puissance frigorifique mécanique installée est d'un peu moins de 200 W/m². Des courbes de charge mesurées de la consommation électrique au niveau du tableau général et au niveau de l'ASI des installations de sécurité (IS) sont disponibles. La consommation électrique à partir du réseau électrique 50 Hz s'est chiffrée à 53'060 kWh en 2018.

⁸ Mémoire de Master de Mario Nikolic, Quaderstrasse 1, 7205 Zizers, en vue de l'obtention du diplôme Executive Master of Business Administration FH, remis le 24 juillet 2019 à la haute école suisse Kalaidos Fachhochschule. Le mémoire n'est pas accessible au public.

■

Différents modèles de calcul ont été évalués et validés. Les modèles avec une prise en compte simplifiée de la masse de stockage thermique selon la norme SIA 2044:2011 ont, pour les types de constructions faiblement ou non isolées, abouti à des écarts de température systématiques et ne doivent pas servir au dimensionnement de l'isolation thermique. Ces modèles sont en revanche applicables pour les études comparatives.



Illustration 5: Vue extérieure réelle du type de bâtiment ferroviaire «Netstal» modélisé.

Charges de rejets de chaleur réelles comme base pour la conception de la technique du bâtiment

La conception de la ventilation et du refroidissement à l'intérieur du bâtiment ferroviaire se fonde sur les connaissances des charges internes de rejets de chaleur. Les puissances électriques raccordées des composants à l'intérieur du bâtiment ferroviaire fournissent peu d'informations sur la charge effective de rejets de chaleur pendant l'exploitation. Dans le cadre de ce projet, des puissances de référence électriques mesurées sur des bâtiments ferroviaires réels ont été analysées.

Le raccordement au réseau d'un bâtiment ferroviaire alimente fréquemment des consommateurs externes, notamment des éclairages, des systèmes d'information à la clientèle ou des signaux et barrières de gares voisines. Ces consommateurs externes ne génèrent pas de rejets de chaleur à l'intérieur du bâtiment ferroviaire et doivent être délimités pour la conception des installations CVC. L'analyse montre que la charge de base nocturne générée au niveau de l'ASI des installations de sécurité représente la meilleure approximation disponible des charges effectives de rejets de chaleur produites à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment ferroviaire. La consommation à l'intérieur de l'enveloppe se présente sous la forme d'une charge de base constante.

Les installations de ventilation et de climatisation examinées étaient (à l'exception de certains bâtiments anciens) clairement surdimensionnées. Sur huit des objets examinés, la charge de base électrique se situait entre 25 et 65 W/m², pour une puissance frigorifique installée entre 83 et 197 W/m² (Illustration 6).

Les raisons de ce surdimensionnement sont probablement à chercher parmi les éléments suivants:

- valeurs indicatives⁹ concernant la puissance frigorifique spécifique à installer entre 50 et 200 W/m².
- prise en compte des réserves de surface dans le dimensionnement pour un futur remplacement d'un poste d'enclenchement pendant l'exploitation.
- utilisation des puissances (raccordées) des composants installés non significatives pour la génération de rejets de chaleur pendant l'exploitation normale.

Les apports thermiques d'origine solaire ne sont pas importants comparativement aux charges internes de rejets de chaleur. Pour tous les types de construction contrôlés n'entraînant pas un phénomène de gel pendant l'hiver, les apports d'origine solaire pour les locaux techniques sans fenêtres sont inférieurs à 6 W par m² de surface de plancher nette (climat de Lugano), contrairement aux charges internes constatées entre 26.5 W/m² et 147 W/m².

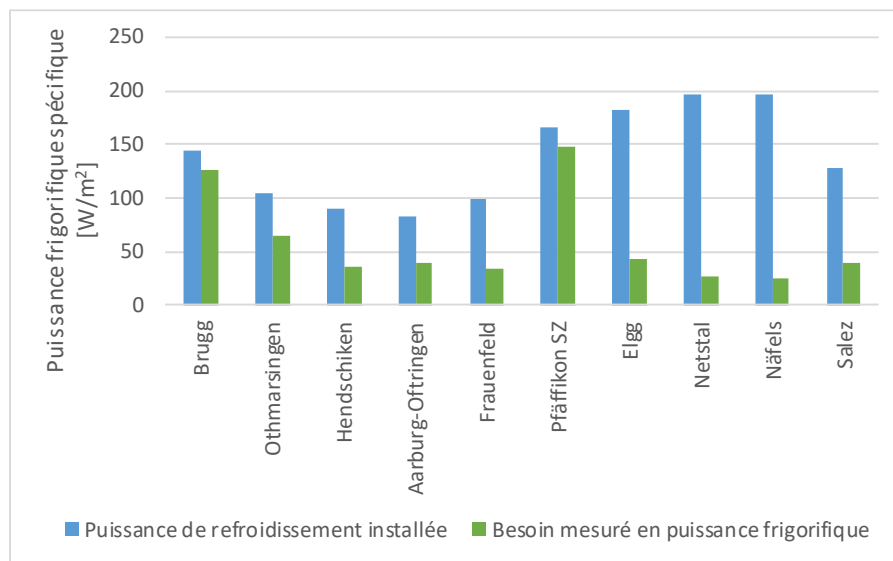


Illustration 6: Puissances frigorifiques installée et nécessaire de dix bâtiments ferroviaires. Les besoins mesurés en puissance frigorifique ont été déterminés sur la base de la charge électrique de base en sortie de l'ASI des installations de sécurité.

Tous les facteurs combinés ont, dans le bâtiment ferroviaire «Netstal» considéré, abouti à un surdimensionnement de la puissance frigorifique d'un facteur 7, ce qui entraîne un fonctionnement cyclique défavorable sur le plan énergétique. Si l'installation de ventilation est largement surdimensionnée par rapport au besoin en refroidissement, la ventilation effectuera des cyclages même en cas de charge maximale, car cette dernière est inférieure de près de 30% à la limite de régulation des entraînements de ventilation et des compresseurs frigorifiques.

⁹ Réglementation CFF, I-50200, Bâtiments pour la technique ferroviaire: Conditions ambiantes et puissances frigorifiques. Document interne valable à partir du 1.8.2017

■

Les connaissances acquises en la matière devraient être prises en considération lors de l'adaptation des réglementations et lors des futures conceptions d'installations de ventilation et de climatisation des bâtiments ferroviaires. Outre les données obtenues ici sur les charges réelles de rejets de chaleur, il serait également possible, en collaboration avec les fabricants, de déterminer des valeurs caractéristiques réalistes pendant l'exploitation normale pour les composants de poste d'enclenchement, les installations de télécommunication, etc. Il est inutile d'inclure les réserves de surface car, en cas d'exploitation parallèle de deux postes d'enclenchement, une unité de froid mobile peut être utilisée.

Des besoins ambiants également déterminants pour l'efficacité

Le niveau de la température ambiante de consigne est déterminant pour les besoins en électricité de la ventilation et du refroidissement dans le bâtiment ferroviaire. Un abaissement de la température ambiante de consigne de 28 °C à 22 °C entraîne pratiquement un doublement des besoins en électricité pour la ventilation et la climatisation.

Il convient de s'interroger sur les spécifications existantes de renouvellement d'air minimal dans le bâtiment ferroviaire. Un seul renouvellement d'air par heure, tel qu'il est par exemple spécifié par les CFF², correspond à peu près au renouvellement hygiénique de l'air dans un bureau. Il n'a pas été possible de clarifier la raison d'un renouvellement d'air aussi élevé dans un local dépourvu de postes de travail permanents. Des quantités d'air nettement plus faibles suffiraient pour l'évacuation des dégazages des batteries au plomb¹⁰ ou d'autres émissions polluantes.

Refroidissement gratuit par le biais d'une enveloppe de bâtiment optimisée

L'isolation thermique et la masse de stockage thermique de l'enveloppe d'un bâtiment ferroviaire devraient être optimisées afin d'éviter un refroidissement trop important pendant l'hiver et de permettre une dissipation passive maximale de la chaleur en été. La règle générale est la suivante: «une isolation thermique réduite au strict nécessaire (hors gel)».

Ce principe s'applique à tous les types de constructions, choix de matériaux et sites. Pour les constructions en béton et les constructions légères en bois, une isolation thermique d'environ 5 cm est nécessaire pour assurer une protection contre le gel en hiver. Le fait d'installer l'isolation sur l'extérieur ou sur l'intérieur n'a aucune influence sur les besoins énergétiques. Concernant les constructions massives en bois, aucune isolation supplémentaire n'est nécessaire en façade. Le coefficient de transmission thermique (valeur U) optimal de toutes les constructions par rapport au climat extérieur est d'environ 0.5 W/m²K.

¹⁰ Les batteries lithium-ion et les batteries au sel résoudront complètement ce problème à l'avenir.

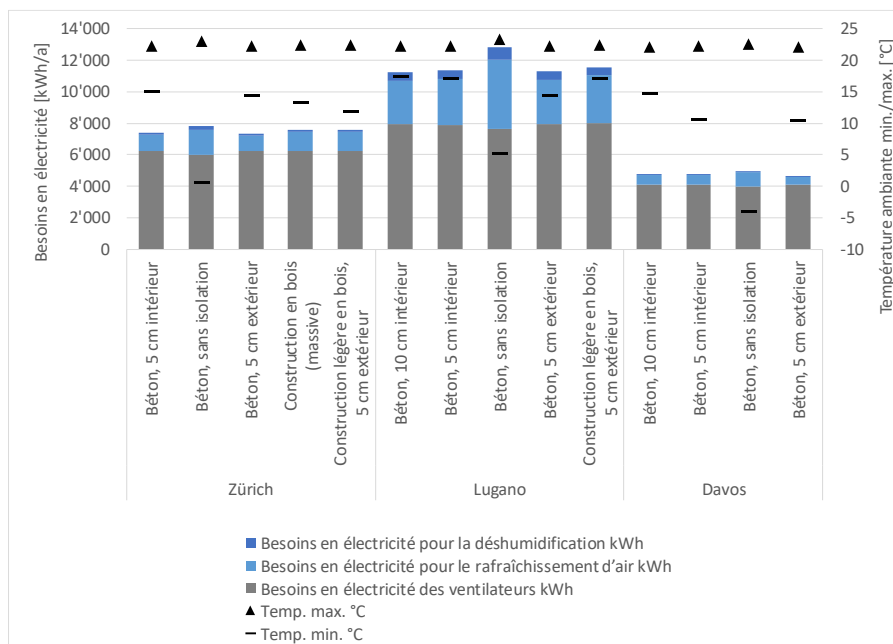


Illustration 7: Consommation d'électricité pour la ventilation et le refroidissement sur différents sites et pour différentes constructions (constructions en béton et constructions massives en bois).

Une masse de stockage thermique élevée ou sa «gestion» au moyen d'un refroidissement nocturne ne sont pas appropriées pour un bâtiment ferroviaire. Sur l'ensemble de l'année, une construction légère en bois, en dépit de sa masse de stockage thermique nettement plus réduite, a une consommation d'électricité somme toute très légèrement supérieure à la construction en béton pour la ventilation et le refroidissement (Illustration 7), et un refroidissement nocturne aboutit globalement à un net surcroît de consommation (Abbildung 47, page 75).

Lors du dimensionnement de l'isolation, une différenciation selon le site n'est pas nécessaire. Une enveloppe de bâtiment avec une valeur U d'environ $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ constitue un très bon compromis sur tous les sites (Illustration 7). En revanche, lorsqu'elles ne sont pas isolées, les constructions en béton ou les constructions légères en bois présentent un risque de gel et ne sont pas non plus optimales sur le plan énergétique.

Principes de la ventilation et du refroidissement dans le local technique

Un concept reposant exclusivement sur le free cooling (refroidissement avec l'air extérieur) n'est possible, pour les bâtiments ferroviaires, que dans les zones alpines avec des charges de rejets de chaleur unitaires réduites et une température ambiante tolérée élevée. Dans ce cas toutefois, ce concept s'avère très efficace. Dans le Plateau et avec des charges de rejets de chaleur types, un système monobloc à refroidissement direct par l'air extérieur présente des avantages sur le plan énergétique par rapport à un aéro-refroidisseur (avec free coo-

ling direct ou indirect). Cela tient à la diminution du nombre de transferts thermiques à surmonter et ainsi à la possibilité d'utiliser le free cooling sur une plus grande période de l'année.

Le système monobloc de ventilation devrait être équipé d'un mode recirculation, afin de pouvoir l'utiliser en été, lorsque la température de l'air extérieur est supérieure à la température ambiante. La proportion minimale de 25% d'air extérieur constatée pour l'objet de référence correspond à plus de deux renouvellements d'air par heure et est inutilement élevée pour garantir une qualité minimale de l'air ou pour évacuer les dégazages des batteries.

La part de la ventilation dans les besoins énergétiques pour la ventilation et le refroidissement du bâtiment ferroviaire est très élevée. Les besoins en électricité pour la ventilation sont multipliés par trois par rapport à la quantité d'air mise en mouvement. Un ventilateur dont le fonctionnement alterne régulièrement entre 0 % et 100 % consomme, au fil du temps, près du double d'électricité par rapport à un ventilateur fonctionnant constamment à 50 % même si, au final, la quantité d'air déplacée est identique. Un fonctionnement régulier présente de gros avantages par rapport à un fonctionnement cyclique.

Le renouvellement d'air nécessaire maximal, pour une charge de rejets de chaleur donnée et un différentiel de température dT donné entre la valeur ambiante de consigne et la valeur d'air frais, est déterminé approximativement selon la Formule 2.

$$\text{Renouvellement d'air } [h^{-1}] = \frac{(\text{Charge de rejets de chaleur spéc. } [\frac{W}{m^2}] + \text{Charge solaire } [\frac{W}{m^2}]) * 3.6 [\frac{kJ}{Wh}]}{\text{Hauteur du local } [m] * dT [K] * c_p [\frac{kJ}{kg * K}] * \rho [\frac{kg}{m^3}]}$$

Formule 2: Calcul du renouvellement d'air nécessaire pour une valeur donnée de charge thermique, de hauteur de local et de différentiel de température entre la température d'air frais et la température ambiante de consigne.

Les apports thermiques d'origine solaire sont minimes comparativement aux charges de rejets de chaleur types constatées de 26 à 65 W/m². Pour le bâtiment ferroviaire sans fenêtres, en béton et avec une isolation intérieure de 5 cm de Zurich, la valeur pendant la semaine estivale la plus chaude est de seulement 3 W par m² de surface de plancher nette.

La température d'air frais en mode d'exploitation avec refroidissement mécanique est idéalement environ 7 à 10 K au-dessous de la température ambiante de consigne. Des températures d'air frais plus basses conduisent à une déshumidification indésirable de l'air frais, laquelle est inexploitable dans le local, et des écarts plus faibles aboutissent à une forte augmentation des besoins en électricité pour la ventilation.

Plus le différentiel de température est réduit entre l'air extérieur et la température ambiante de consigne, plus il faut faire circuler d'air en free cooling pour atteindre une puissance frigorifique donnée. Ainsi, il existe un point de commutation optimal entre le free cooling et le refroidissement mécanique. À partir

■

d'un différentiel de température d'environ 4 K entre l'air extérieur et l'air intérieur, l'efficacité du free cooling au moyen de l'air extérieur est supérieure à l'approche du refroidissement mécanique.

Un potentiel d'économies important grâce une régulation optimisée des installations

Au niveau des bâtiments ferroviaires analysés, la quantité d'air brassée par ventilateur en mode free cooling est régulée en fonction du différentiel de température à l'intérieur du local et à l'extérieur. Cette différence de température ne constitue toutefois pas un bon indicateur de valeur de consigne: dans les locaux présentant des charges internes élevées, la température extérieure est insuffisamment corrélée aux besoins en refroidissement, car les charges d'origine solaire représentent seulement une petite partie des apports. Par ailleurs, le mode de fonctionnement avec refroidissement mécanique régule à une température d'air frais fixe pour une quantité d'air constante de 100% et le refroidisseur s'enclenche à une température ambiante fixe, peu importe si les besoins en refroidissement existants peuvent encore être couverts avec le free cooling. La régulation existante ne «connaît» pas les besoins effectifs en refroidissement du local et ne peut pas assurer une gestion optimale de la quantité d'air et du mode de fonctionnement. Dans la pratique, en particulier pour les installations surdimensionnées, cela aboutit à des cyclages importants, à un brassage inutile de l'air et à une consommation d'électricité élevée des ventilateurs.

Une régulation gérée par un régulateur PID selon les besoins en refroidissement effectif du local est porteuse d'un potentiel d'économies important¹¹. La demande de refroidissement dans le bâtiment ferroviaire n'est en réalité pas mesurable directement, mais doit être approchée en continu par une mesure itérative de l'écart entre la température ambiante et la valeur de consigne. Le régulateur optimisé exécute le cycle de régulation suivant:

1. mesure de l'écart entre la température ambiante et la valeur de consigne.
2. calcul de la valeur de réglage pour les besoins en refroidissement à couvrir à partir de l'écart de régulation, de l'intégrale de l'écart de régulation et, le cas échéant, de la différence d'écart de régulation par rapport au dernier intervalle de temps (régulateur PID).
3. calcul de la puissance frigorifique maximale possible au moyen du free cooling, du refroidissement mécanique et en mode recirculation pour une quantité d'air de 100% et aux températures et spécifications données.
4. décision du mode à sélectionner sur la base de son aptitude à couvrir les besoins et de son efficacité (1^{re} priorité «free cooling» avec l'air extérieur, 2^e priorité «refroidissement mécanique»).
5. calcul de la quantité d'air nécessaire dans le mode sélectionné comme rapport entre la puissance frigorifique maximale possible (étape 3) et la demande de froid (étape 2), détermination de la part de recirculation éventuellement nécessaire en cas de températures d'air extérieur trop

¹¹ Un régulateur PID est un mécanisme à boucle fermée avec rétroaction, lequel adapte en permanence une grandeur de réglage sur la base de la mesure continue d'un écart de régulation.

basses ou d'une enthalpie de l'air extérieur par le biais de celle de l'air intérieur.

6. Retour à l'étape 1

Les économies d'électricité réalisées via la régulation optimisée de la ventilation et du refroidissement dans le bâtiment ferroviaire¹² se situent entre 0% et plus de 50%, selon les conditions limites, et proviennent principalement de la diminution de l'air inutile mis en circulation (Illustration 8). La régulation optimisée procure les économies les plus importantes dans les installations surdimensionnées présentes sur le terrain. Le régulateur optimisé maintient par ailleurs mieux la température de consigne à charges élevées.

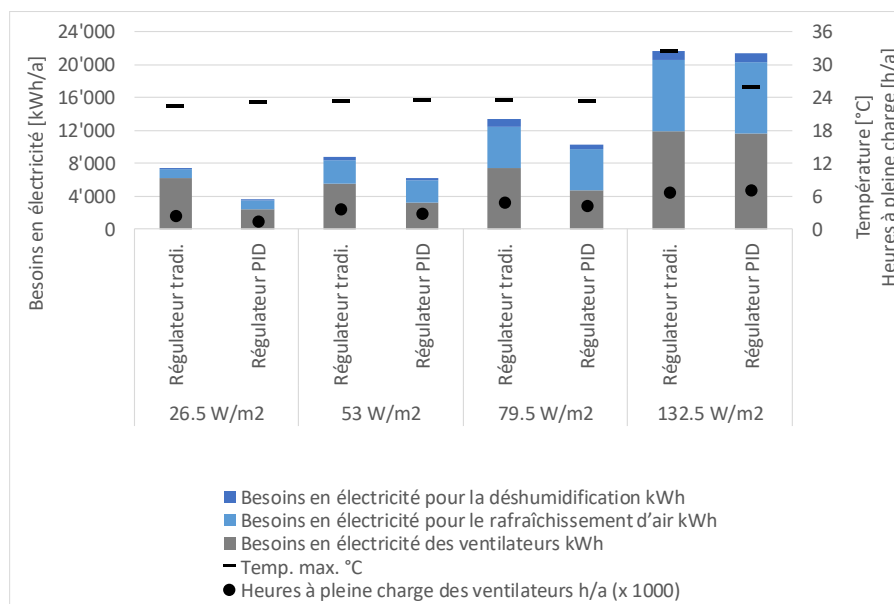


Illustration 8: consommation d'électricité pour la ventilation et le refroidissement dans le bâtiment ferroviaire pour différentes régulations et charges internes.

Par ailleurs, le besoin de cyclage du compresseur est nettement réduit et l'efficacité du refroidissement (exprimée sous la forme PUE¹³) ne dépend plus du niveau de la charge interne (Tableau 3).

¹² Construction en béton avec isolation intérieure de 5 cm, infiltration 0,15 fois, climat de Zurich, température ambiante de consigne 22° C, 9,5 renouvellements d'air, température d'air frais 12° C pour un refroidissement méc., température d'air frais minimale de 5° C en hiver. Régulation existante: free cooling à partir d'une température ambiante de 18,5° C et refroidissement méc. à partir de 21,5° C.

¹³ PUE = Power Usage Effectiveness



Tableau 3: Autres valeurs comparées entre le régulateur traditionnel et le régulateur PID pour différentes charges internes.

Charge interne	Régulateur	PUE	Économies d'électricité	Réduction des enclenchements de machines
W/m^2				
26.5	Régulateur tradi.	1.36		
	Régulateur PID	1.14	-52%	-34%
53	Régulateur tradi.	1.18		
	Régulateur PID	1.12	-30%	-99%
79.5	Régulateur tradi.	1.19		
	Régulateur PID	1.14	-23%	-100%
132.5	Régulateur tradi.	1.18		
	Régulateur PID	1.18	-1%	-89%

En principe, la stratégie de régulation développée peut aussi être mise en œuvre dans le parc existant, dans la mesure où elle ne requiert aucun capteur ni actionneur supplémentaire.

Couverture des besoins propres avec le photovoltaïque

Les bâtiments ferroviaires sont, en raison du profil de charge électrique constant, des objets tout indiqués pour une utilisation du photovoltaïque. Des variantes d'installations en toiture et en façade, avec et sans accumulateur à batterie, ont été testées et leur caractéristique de couverture et leur rentabilité ont été comparées.

Dans les conditions limites considérées, seule l'installation en toiture sans batterie présente une rentabilité avantageuse (Tableau 4). Toutes les variantes, y compris sans batterie, aboutissent à une consommation propre d'au minimum 60%. L'augmentation de la consommation propre avec les batteries ne justifie pas un investissement dans celles-ci. D'autre part, les investissements plus élevés liés à l'installation en façade présentent un ratio défavorable par rapport au rendement supplémentaire, même si ce type d'installation fournit plus d'électricité «précieuse» en hiver.





Tableau 4: résultats de l'étude de variantes pour la production d'électricité sur le site du bâtiment ferroviaire.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 1c	Variante 1d	Variante 2	Variante 3
		Façade sud, est et ouest				Toiture	Façade sud et est
Nombre de modules (de 1,63 m2)	Nbre			84		44	68
Puissance installée (327 Wp par module)	kWp			27.5		14.4	22.2
Capacité des batteries	kWh	-	7.7	15.4	23.1	-	-
Production annuelle de l'installation photovoltaïque	kWh/a			19'587		13'540	16'476
Rendement par kWp de puissance installée	kWh/kWp			713		941	741
Part de consommation propre du photovoltaïque		60%	71%	79%	85%	73%	64%
Électricité photovoltaïque injectée dans le réseau		40%	29%	21%	15%	27%	36%
Degré d'autosuffisance du photovoltaïque		22%	26%	29%	31%	19%	20%
Fourniture d'électricité par le réseau		78%	74%	71%	69%	81%	80%
Bilan annuel de la part du photovoltaïque				37%		26%	31%
Rendement annuel (consommation propre, injection dans le réseau)	CHF/a					1'701	1'930
Coûts du capital	CHF/a	4'008	4'911	5'453	5'904	1'468	3'293
Coûts annuels	CHF/a	1'784	2'493	2'892	3'234	-234	1'363

Les conditions limites actuelles¹⁴ dans le secteur de l'énergie, sans la pondération d'autres facteurs (notamment l'exemplarité, la contribution à des objectifs prioritaires), conduisent à une optimisation économique des installations individuelles et donc à de nombreuses installations de petite taille. Pour atteindre l'objectif prioritaire visant à augmenter de manière rentable la part d'électricité renouvelable dans le réseau, cette solution n'est vraisemblablement pas optimale, car de nombreuses petites installations sont globalement plus onéreuses que quelques grandes installations. Comme les structures d'incitation actuelles ne sont pas non plus gravées dans le marbre, il convient de ne pas pondérer trop fortement la rentabilité individuelle de chaque installation individuelle.

¹⁴ Coûts d'investissement, tarifs de fourniture de l'électricité, tarifs de rachat



Les principes de planification essentiels

Conception des installations de ventilation et de climatisation

- Pour les locaux techniques sans exigences particulières, un **concept de refroidissement avec utilisation directe de l'air extérieur (free cooling direct)** s'impose du point de vue énergétique. Le nombre d'heures annuelles de recours possible au free cooling est ainsi supérieur au nombre atteint avec une solution de refroidissement par ventilation.
- La conception des installations de ventilation et de climatisation dans les bâtiments ferroviaires devrait, à l'avenir, être encore mieux adaptée aux besoins effectifs en refroidissement. **Des installations surdimensionnées aboutissent à des cycles de fonctionnement inefficaces.** Les besoins en électricité pour la ventilation sont multipliés par trois par rapport à la quantité d'air mise en mouvement et constituent, dans les bâtiments ferroviaires, le principal facteur des besoins énergétiques pour la ventilation et le refroidissement. Un ventilateur dont le fonctionnement alterne régulièrement entre 0 % et 100 % consomme, au fil du temps, près du double d'électricité par rapport à un ventilateur fonctionnant constamment à 50 % même si, au final, la quantité d'air déplacée est identique.
- Les **réserves de surface ne doivent pas être prises en compte lors de la conception des installations CVC** (le cas échéant, prévoir une unité de froid mobile) et il convient d'utiliser des valeurs caractéristiques réalistes pour les charges de rejets de chaleur réellement escomptables. Les puissances raccordées ne sont pas adaptées pour cela. **La charge de base en sortie de l'ASI des installations de sécurité s'est révélée être un bon indicateur des rejets de chaleur à l'intérieur du bâtiment ferroviaire pendant l'exploitation réelle.** La charge interne de rejets de chaleur demeure très constante tout au long de l'année et les apports d'origine solaire sont réduits par rapport aux rejets de chaleur internes pour les locaux sans fenêtres.
- Afin d'avoir une **meilleure base de données pour les futurs dimensionnements d'installations**, il est possible, d'une part, de déterminer des charges réalistes de rejets de chaleur en exploitation avec les fournisseurs de composants et, d'autre part, la consommation d'électricité de bâtiments ferroviaires de référence en charge réelle peut être mesurée. Afin de comprendre les charges internes réelles, nous proposons de mesurer et d'enregistrer la courbe de charge d'électricité à la sortie de l'ASI des installations de sécurité.
- Les **valeurs de consigne pour la température ambiante dans le bâtiment ferroviaire influent très fortement sur les besoins énergétiques.** Un abaissement de la température ambiante de consigne de 28 °C à 22 °C correspond pratiquement à un doublement des besoins en électricité pour la ventilation et le refroidissement. Les efforts pour améliorer l'efficacité énergétique entrent en concurrence avec la durée de vie allongée des composants électroniques à des températures ambiantes plus basses.
- Le **renouvellement maximal nécessaire de l'air pour le refroidissement**, pour une charge de rejets de chaleur donnée et un différentiel de température dT donné entre la valeur ambiante de consigne et la

valeur d'air frais, est déterminé approximativement selon la formule suivante:

$$\text{Renouvellement d'air [h}^{-1}\text{]} = \frac{(\text{Charge de rejets de chaleur spéc. } [\frac{W}{m^2}] + \text{Charge solaire } [\frac{W}{m^2}]) * 3.6 [\frac{kJ}{Wh}]}{\text{Hauteur du local [m]} * dT [K] * c_p [\frac{kJ}{kg * K}] * \rho [\frac{kg}{m^3}]}$$

Les apports thermiques d'origine solaire sont minimes comparative-ment aux charges de rejets de chaleur types (env. 3 à 5 W/m² de la sur- face de plancher nette). La température d'air frais en cas de refroidis- sement mécanique est idéalement de 7 à 10 K au-dessous de la tempé- rature ambiante de consigne. Des températures d'air frais plus basses conduisent à une déshumidification inutile, et des écarts plus faibles aboutissent à une forte augmentation des besoins en électricité pour la ventilation.

Optimisation de l'enveloppe du bâtiment

- La règle générale est la suivante: **«une isolation thermique réduite au strict nécessaire (hors gel)»**. Ce principe s'applique à tous les types de constructions, choix de matériaux et sites. Le coefficient de transmis- sion thermique (valeur U) optimal de toutes les constructions par rap- port au climat extérieur est d'environ 0.5 W/m²K. Des constructions lé- gères en bois ou en béton ou encore des constructions massives en bois sont ainsi possibles.
- Une **masse de stockage thermique élevée n'est pas utile pour les bâ- timents ferroviaires** et un refroidissement nocturne actif via la ventila- tion est même contre-productif.

Régulation de l'installation de ventilation et de climatisation

- **Une régulation des installations de ventilation et de climatisation en fonction des besoins de refroidissement ou de l'écart entre la tempé- rature ambiante et la valeur de consigne procure des économies d'énergie jusqu'à 50 % au niveau de la ventilation et du refroidisse- ment.** Les régulateurs PID sont appropriés dans ce cas, car ils mesurent en permanence l'écart entre la température ambiante et la valeur de consigne, et déterminent alors si l'apport de froid doit être augmenté ou réduit.
- En général, les économies réalisées par une régulation optimisée con- cernent principalement la **réduction du renouvellement inutile de l'air**. La quantité d'air doit être régulée en fonction des besoins de re- froidissement et non en fonction des températures ambiante et exté- rieure. Même en présence d'un froid mécanique, la quantité d'air doit être variable.
- Des **taux de renouvellement d'air minimaux, une proportion d'air ex- térieur minimale en mode recirculation ou une purge périodique** doi- vent être déterminés en fonction des besoins, en tenant compte des exigences spécifiques (p. ex. dégazages des batteries au plomb). Des spécifications globales telles qu'un seul renouvellement d'air par heure

■

conduisent à une consommation d'électricité très élevée et inutile des entraînements de ventilation.

- Le **passage du free cooling au refroidissement mécanique** intervient en cas de différentiel de température d'env. 4 K entre l'air extérieur et la température ambiante de consigne. En cas de différences de température plus faibles, le refroidissement mécanique est plus efficace.

Le photovoltaïque sur le site des bâtiments ferroviaires

- Les bâtiments ferroviaires sont, en raison du profil de charge électrique constant, des **objets tout indiqués pour une utilisation du photovoltaïque**.
- Avec les structures d'incitation actuelles, les **installations en toiture présentent un intérêt économique**. Les batteries et installations en façade sont moins intéressantes du point de vue purement économique.
- **Une optimisation économique par objet n'aboutit pas nécessairement à la réalisation rentable des objectifs prioritaires.**



1. WORUM GEHT ES?

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Leitfaden für Bahninfrastrukturbetreiber zur Identifizierung und Umsetzung von Energieeffizienzmassnahmen und den Ausbau erneuerbarer Energien bei Bahntechnikgebäuden (BTG) entwickelt.

Anhand der Analyse von ausgewählten Bahntechnikgebäudetypen der beteiligten Bahnunternehmen wurden betriebliche Anforderungen analysiert sowie gängige Herangehensweisen bei der Planung und Realisierung solcher Technikbauten hinterfragt. Es wurden verschiedene Massnahmen an der Schnittstelle zwischen Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Bahninfrastruktur im Simulationsmodell getestet und optimierte Lösungen abgeleitet. In einer externen Masterarbeit wurden zusätzlich Rahmenbedingungen für eine erfolgversprechende Implementierung der Erkenntnisse identifiziert. Zentrale Massnahmen wurden vertieft, abstrahiert und in einem anwendungsnahen Leitfaden zusammengestellt.

Der Leitfaden besteht aus Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Identifizierung und Realisierung von Effizienzpotentialen am Bahntechnikgebäude. Er liefert praxisnahe Werkzeuge zur Potenzialabschätzung und Planungshinweise für die Umsetzung. Der Leitfaden und seine Werkzeuge stehen allen Bahnunternehmen zur Integration in ihre internen Abläufe sowie zur direkten Anwendung zur Verfügung. Er hat darüber hinaus Relevanz für alle Technikräume ohne ständige Arbeitsplätze mit internen Abwärmelasten.



2. HERAUSFORDERUNG

2.1 Energieeffizienz im Bahntechnikgebäude

Neben der eigentlichen Beförderung von Personen und Gütern sind Bahntechnikanlagen mit entsprechenden Infrastrukturanlagen gewichtige Nebenenergieverbraucher. Dazu gehören insbesondere entlang der Linien in Bahnhofsnähe platzierte BTG mit Stellwerken sowie Anlagen zur Telekommunikation, Sicherung und Stromversorgung. Diese Bauten oder in Bauten integrierten Räume sind aufgrund der hohen internen Wärmelasten in aller Regel aktiv belüftet und in den meisten Fällen auch aktiv (mittels Kältemaschine) gekühlt.

Möglichen Massnahmen für eine verbesserte Energieeffizienz und die Integration erneuerbarer Energien an der Schnittstelle zwischen Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Bahninfrastruktur stehen technische und betriebliche Anforderungen sowie unterschiedliche Verantwortlichkeiten gegenüber, was ihre Umsetzung kompliziert und koordinationsbedürftig macht.

Die Herausforderung bei den BTG liegt im aktuellen Kontext von Energiewende und Klimawandel darin, die baulichen und technischen Rahmenbedingungen dieser Infrastrukturen so zu gestalten, dass diese mit möglichst wenig Primärenergieaufwand und möglichst geringen Treibhausgasemissionen ihre Funktion erfüllen können. Hierbei liegt der Fokus auf der Stromeffizienz, da die Gebäudebeheizung hier kaum Relevanz aufweist.

2.2 Warum Bahntechnikgebäude?

Der Fokus des Projekts richtet sich auf Bahntechnikgebäude (BTG). BTG sind Technikgebäude ohne dauernde Personenanwesenheit, welche technische Anlagen im Bereich der Bahninfrastruktur (Stellwerke, Telekommunikation, Sicherungsanlagen) umfassen und zur unterbrechungsfreien Erbringung dieser Leistungen in der Regel mit Batterien, USV, mechanischer Lüftung und aktiver Kühlung versehen sind.

Mit den BTG wurde der Fokus des Projekts auf typischerweise relativ stark standardisierte und verbreitete Gebäudetypen gelegt. Es geht im Leitfaden also nicht darum, exotische oder hochkomplexe Massnahmen für Einzelfälle abzuleiten, sondern in der Breite anwendbare Verbesserungen aufzuzeigen und deren Umsetzung zu vereinfachen. Dieser Fokus erlaubt es, die Erkenntnisse und Werkzeuge des Leitfadens bei den unterschiedlichen Bahnunternehmen oder sogar darüber hinaus, bei Gebäudebetreibern mit ähnlichen Randbedingungen, anzuwenden.

Am Beispiel der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) zeigt sich: Der Strombedarf ab 50-Hz-Netz entlang der Bahntrassen¹⁵ betrug 2016 rund 122 GWh und damit rund 50 % des gesamten 50-Hz-Verbrauchs der SBB. Wie viel davon die

¹⁵ Telekommunikation, Sicherungsanlagen, Beleuchtung Bahnzugang und Gleisfeld, Kundeninformation, Förderanlagen, Tunnel, Stromversorgung 50 Hz und USV-Anlagen, ohne Fahrstrom 16.7 Hz und ohne Grossbahnhöfe, Industriewerke und Serviceanlagen. Quelle: M. Rücker, M. Ruch: «Konzept Transparenz von ortsfesten Anlagen», 18.1.2016, SBB AG (internes Dokument).

■

BTG ausmachen, ist nicht direkt abgrenzbar, weil nicht alle Verbraucher gemessen werden und über die BTG häufig auch noch weitere Verbraucher von Bahnhöfen oder Bahnzugang angeschlossen sind. Der Strombedarf aller BTG dürfte aber ein relevanter Anteil des gesamten 50-Hz-Verbrauchs sein, denn es handelt sich um schweizweit hundertfach vorhandenen Verbrauchertyp.

Stellwerk-BTG sind schweizweit bei allen beteiligten Bahnen vorhanden und weisen teils standardisierte Gebäudehüllen auf. Die Nutzungen unterliegen dabei ähnlichen Anforderungen an das Raumklima, die Belüftung und die Verfügbarkeit. Spezielle Bahntechnikobjekte (z.B. Gross-Stellwerke) sind im Gegensatz dazu Einzelfälle, welche häufig innerhalb komplexer Gebäudestrukturen untergebracht sind und wenig in der Breite abstrahierbares Massnahmenpotenzial bieten.

Gegenstand des Leitfadens sind die Gebäude und deren haustechnische Anlagen (Lüftung, Klimakälte). Es geht hier nicht darum, die Prozesse, welche Abwärme im Gebäude verursachen, zu optimieren (wie Stellwerkkomponenten, unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV) oder Batterien), sondern um die optimale Infrastruktur für eine energieeffiziente Beherbergung dieser Prozesse.

Es zeigte sich im Projektverlauf, dass die identifizierten Probleme und ihre Lösungen nicht nur auf standardisierte BTG einer gewissen Bauweise und technischen Ausrüstung zutreffen, sondern im weiten Bereichen auch auf andere technische Räumlichkeiten ohne ständige Personenpräsenz übertragbar sind.

2.3 Herausforderungen und Aufbau des Dokuments

Im Laufe der Projektbearbeitung haben sich folgende Aspekte als zentrale Herausforderungen zur Steigerung der Energieeffizienz im BTG herausgestellt:

- **Optimale Gebäudehülle** Das typische BTG ist ein reiner Technikraum ohne dauerhafte Arbeitsplätze, und im Inneren fallen im Verhältnis zur Fläche nennenswerte Abwärmelasten an. Die ideale Gebäudehülle unterstützt die natürliche Auskühlung des Raumes und die Rolle der thermischen Speichermasse ist zu bewerten. Wir haben verschiedene Materialisierungen in verschiedenen Klimazonen geprüft und Grundsätze zur Gestaltung der Gebäudehülle abgeleitet (Abschnitt 4.3).
- **Dimensionierung der HLK-Anlagen** Passive Kühlung oder ausschliesslich natürliche Lüftung reichen in den meisten Fällen nicht aus, um ein BTG innerhalb der gewünschten Bedingungen (Abschnitt 4.1) zu halten. Beim Bau steht man vor der Herausforderung, Lüftungs- und Kälteanlagen für interne Lasten auszulegen, die man in der Praxis nicht so genau kennt. Die Analyse zeigt, dass häufig zu grosse Lüftungs- und Kälteanlagen verbaut werden. Wir haben bestehende BTG bezüglich ihrer effektiven internen Lasten ausgewertet und interne von externen Lasten abgegrenzt (Abschnitt 4.2). Diese Daten können helfen, in Zukunft weniger Reserven zu verbauen und damit einen effizienteren Betrieb der Anlagen zu erreichen.
- **Regelung der HLK-Anlagen** Technische Räume sind nach anderen Prinzipien zu belüften und zu kühlen als Räume mit Personenaufenthalt. Wir haben bestehende Regelungen im Detail analysiert, verschiedene



Aspekte einer effizienten Lüftung analysiert (Abschnitt 4.4) und verbesserte Algorithmen abgeleitet, welche den Strombedarf für Lüftung und mechanische Kühlung deutlich senken können (Abschnitt 4.5).

- **Eigenversorgung mit Photovoltaik** BTG weisen mit einer beträchtlichen Bandlast gute Bedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Photovoltaik am Standort auf. Wir haben verschiedene Belegungsvarianten auf Dach und Fassade sowie Batteriegrößen geprüft und deren Wirtschaftlichkeit verglichen (Abschnitt 4.6).

Die identifizierten Bereiche werden im Folgenden näher analysiert und mögliche Lösungen aufgezeigt.



3. METHODIK

3.1 Form und Inhalt des Leitfadens

Der Leitfaden analysiert und bewertet hauptsächlich technische und bauliche Aspekte einer effizienten Infrastruktur für Technikräume. Er leitet daraus Prinzipien, Faustregeln und konkrete technische Vorgaben zur Anwendung in der Praxis der Planung, Realisierung und Optimierung von Technikräumen ab. Die Erkenntnisse aus dem Analyseteil dieses Projekts sollen also möglichst in die Praxis der Bahnunternehmen (und ggf. weiterer Akteure mit ähnlichen Randbedingungen) einfließen.

Es ist offensichtlich, dass es sich hierbei um ein schwieriges Vorhaben handelt, weil mit den abgeleiteten Erkenntnissen bestehende Vorgehensweisen hinterfragt und geändert werden müssen und weil verschiedene Abteilungen und Interessen tangiert werden. Es ist also nicht damit getan, dass die Existenz des Leitfadens resp. seiner Erkenntnisse in den Bahnunternehmen kommuniziert wird, sondern es wird zur verbreiteten Anwendung wohl Nachdruck und Support von oben brauchen. Nach der Publikation des Leitfadens durch das BAV soll die Einführung in den unterschiedlichen Geschäftsbereichen und Einheiten mittels eines Top-Down-Ansatzes erfolgen.

Um die Bedingungen für eine erfolgreiche Einführung und Implementierung des Leitfadens in den Bahnunternehmen zu klären, wurde die folgende Fragestellung im Rahmen einer Masterarbeit durch Mario Nikolic bearbeitet: «Unter welchen erfolgsrelevanten Randbedingungen kann der Leitfaden ESÖV 2050¹⁶ im Management der SBB Division Infrastruktur eingeführt und implementiert werden?»¹⁷. In der Arbeit wurde untersucht, wie die Erkenntnisse des Leitfadens über das normative, das strategische und das operative Management in der prozessualen Geschäftsumgebung verankert werden können. Ausgewählte Fachexperten und Führungskräfte der SBB leisteten durch qualitative Experteninterviews einen wichtigen Beitrag zur Klärung dieser Fragestellung.

die normativen und organisatorischen Strukturen der SBB im Hinblick auf die Verankerung der Erkenntnisse des Leitfadens untersucht und qualitative Interviews mit Führungskräften der SBB durchgeführt und ausgewertet.

Die Masterarbeit unterliegt einer Geheimhaltungsvereinbarung zwischen den SBB und der Fachhochschule. Die Inhalte sind vertraulich und werden nicht veröffentlicht. Mit Zustimmung der Beteiligten dürfen die folgenden Erkenntnisse an dieser Stelle wiedergegeben werden.

Die Erkenntnisse des Leitfadens sollten in drei Phasen im Unternehmen verankert werden:

¹⁶ Programm Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr

¹⁷ Masterarbeit von Mario Nikolic, Quaderstrasse 1, 7205 Zizers, zur Erlangung des Executive Master of Business Administration FH, eingereicht am 24. Juli 2019 bei der Kalaidos Fachhochschule Schweiz.

- **Normativ (Einführung):** Der Leitfaden ESöV 2050 ist durch eine bedarfsgerechte Kommunikationsstrategie auf die bestehenden, übergeordneten Share- und Stakeholderziele des Unternehmens auszurichten. Der Leitfaden soll dadurch die Erreichung der Ziele der Eigentümer- und Nachhaltigkeitsstrategie aktiv unterstützen. Der Leitfaden sollte durch das Top-Management für die interne Anwendung legitimiert werden.
- **Strategisch (Implementierung):** Um eine effiziente Anwendung des Leitfadens im Unternehmen sicherzustellen, ist die Aufnahme des Leitfadens in der richtigen Fachstrategie mit Anpassungen der Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortung (AKV) im passenden Prozessschritt erforderlich.
- **Operativ (Verankerung):** Damit der Leitfaden in konkreten Projekten zur Anwendung kommt, muss dieser in den Regelwerken verankert und dessen Einhaltung mittels entsprechenden Messsystemen und Checklisten überprüft werden. Das Qualitätsmanagement der SBB sichert die Umsetzung der Leitfadenmassnahmen und überträgt die vom System geforderten Kennzahlen nach der Umsetzung im Bottom-Up-Ansatz in das Reporting der entsprechenden Unternehmensziele.

3.2 Viele Freiheitsgrade durch thermische Simulationen

Um zeitintensive und kostspielige Messungen zu vermeiden, wurden die Analysen von Massnahmenwirkungen anhand dynamischer, thermischer Simulationen durchgeführt.

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber einer Umsetzung und Messung von Massnahmen an Pilotanlagen in der Praxis liegt darin, dass nach einem initialen Aufwand zur Modellierung des Referenzgebäudes und dessen technischer Ausstattung fast unbeschränkte Freiheitsgrade zur Erprobung und zum Vergleich von möglichen Massnahmen zur Verfügung stehen. Innerhalb kürzester Zeit stehen Ergebnisse von ganzen Jahresberechnungen für dutzende von Varianten zur Verfügung, bei wahlweise identischen Randbedingungen (z.B. Aussenklima). Verschiedene Gebäudehüllen, Ausrichtungen, Regelungen der Gebäudetechnik oder interne Lasten können detailliert modelliert und ausgewertet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden folgende Simulationsumgebungen eingesetzt:

- Vereinfachtes Modell: Programm in Excel® mit 5-Minuten-Zeitschritten nach SIA Merkblatt 2044:2011, vereinfachte dynamische Berücksichtigung der thermischen Speichermasse¹⁸, Abbildung von HLK-Regelungen, intuitive Anwendung.
- Detailliertes Modell: EnergyPlus¹⁹ mit 3-Minuten-Zeitschritten, detaillierte dynamische Berücksichtigung der thermischen Speichermasse,

¹⁸ Ein Knoten pro Zone für die thermische Masse. Eigenentwicklung von EK Energiekonzepte AG ausserhalb dieses Projekts gemäss SIA Merkblatt 2044:2011 und weiterer SIA-Normen, mit flexibler Lüftungs- und Kälteregelung sowie kürzeren Zeitschritten, in Microsoft Excel®.

¹⁹ Quelle: <https://energyplus.net/>

■

Abbildung von HLK-Regelungen mittels EMS²⁰, aufwändigere Auswertung über Schnittstelle zu Microsoft® Excel®.

- Ertrag von Photovoltaikanlagen mittels Polysun Designer.

Bei der Abbildung und Optimierung von HLK-Regelungen sind Zeitschritte im Minutenbereich nötig. Dies wurde mit den oben genannten Simulationsumgebungen sichergestellt. Nicht Gegenstand der Untersuchungen waren CFD²¹-Simulationen, welche Luftschichtungen und Strömungen im Raum abbilden können.

3.3 Modellvalidierung

Die Ergebnisse des eigens programmierten, vereinfachten Modell in Excel® wurden denjenigen aus dem SIA TEC TOOL²² (stundenweise Berechnung nach SIA Merkblatt 2044:2011) sowie denjenigen aus EnergyPlus gegenübergestellt. Sowohl das SIA TEC TOOL als auch EnergyPlus gelten hierbei als hinreichend validiert.

Zum Vergleich wurde eine identische, fensterlose Zone mit rund 106 m² Nettogeschossfläche im Klima von Zürich mit 3.5 kW interner Abwärme (Profil 24/7 konstant) sowie einer konstanten, mechanischen Lüftung (2-facher Luftwechsel mit Aussenluft) modelliert und über ein Jahr in den zu vergleichenden Modellen simuliert. Die resultierenden Raumlufttemperaturen wurden in jedem Zeitschritt zwischen den Modellen verglichen. Die Modelldifferenzen wurden ermittelt als Summe der Beträge der Abweichungen über das ganze Jahr im Verhältnis zur Summe der Stundenwerte der Raumlufttemperatur des validierten Modells.

Eigenes Modell vs. SIA TEC TOOL (Stundenauflösung): Diese Validierung diente der Kontrolle der Rechenschritte im eigens programmierten Werkzeug in Excel®. Die Temperaturverläufe beider Modelle sind optisch deckungsgleich und das Schwingungsverhalten ist ganzjährig (Abbildung 9) sowie in einer exemplarischen Winter- und Sommerwoche (Abbildung 10) gut übereinstimmend. Die Summe aller Abweichungsbeträge des eigenen Modells liegt bei 2 % über das ganze Jahr.

²⁰ Energy Management System (EMS) ist eine einfache, programmierbare Umgebung innerhalb von EnergyPlus. Sie erlaubt die Erstellung von Steuerungen und Regelungen auf der Basis von Eintrittsbedingungen und nimmt Einfluss auf die Zustände der HLK-Anlagen.

²¹ CFD = Computational Fluid Dynamics

²² Das SIA TEC TOOL dient in der Schweiz als Nachweisinstrument für verschiedene, energie- und komfortbezogene Normen. Mehr Informationen und Bezug unter <https://www.energtools.ch/index.php/de/downloads/tools/download/2-tools/7-sia-tec-tool-de>

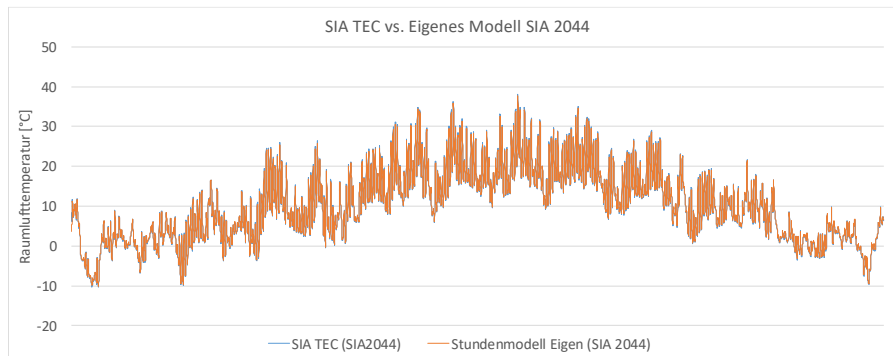


Abbildung 9: Verlauf der Raumlufthtemperatur über ein Jahr im Vergleich zwischen dem SIA TEC Tool und dem eigens programmierten Modell nach SIA 2044:2011 in Excel®.

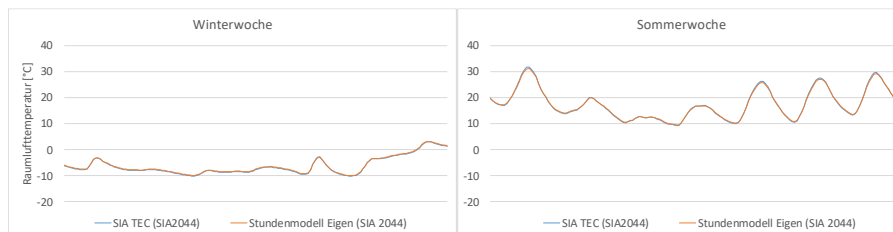


Abbildung 10: Verlauf der Raumlufthtemperatur während einer Winter- und einer Sommerwoche im Vergleich zwischen dem SIA TEC Tool und dem eigens programmierten Modell nach SIA 2044:2011 in Excel®.

Eigenes Modell (Stundenauflösung vs. 5-Minuten-Auflösung): In diesem Schritt wurde geprüft, ob der Umbau des eigenen Modells in Excel® von Stunden- auf 5-Minuten-Auflösung (zwecks detaillierter Abbildung der Regelalgorithmen der Lüftung) zu denselben Ergebnissen führt. Aufgrund des durch die kürzeren Zeitschritte gestiegenen Rechenaufwands musste neu eine sequentielle Abarbeitung in Gruppen von 20 Zeitschritten eingeführt werden, was umfangreiche Anpassungen am Modellkern zur Folge hatte. Die Übereinstimmung beider Modelle konnte bestätigt werden (Abbildung 11), die Abweichung liegt bei 1.6 % kumuliert über das ganze Jahr.

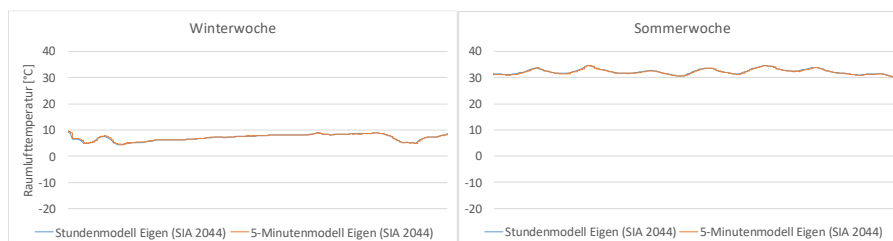


Abbildung 11: Verlauf der Raumlufthtemperatur während einer Winter- und einer Sommerwoche im Vergleich zwischen dem eigens programmierten Modell in Stunden- und 5-Minuten-Auflösung.

Eigenes Modell vs. EnergyPlus-Modell: In diesem Schritt wurde geprüft, ob das eigene Excel®-Modell mit demjenigen in EnergyPlus übereinstimmt. Diese Übereinstimmung ist wesentlich schwieriger sicherzustellen, weil die Rechenalgorithmen im Bereich des Wärmetransports und der thermischen Speichermasse bei EnergyPlus viel detaillierter sind. Es stellte sich heraus, dass das Modell eines

ungedämmten Stahlbetonbaus (20 cm Beton) gemäss SIA 2044:2011 deutlich grössere Tagesschwankungen in Richtung tieferer Raumlufthtemperaturen zeigt als derselbe Raum in EnergyPlus (Abbildung 12 und Abbildung 13). Die Summe aller Abweichungsbeträge des Modells in Excel® über das ganze Jahr liegt bei 18.2 %, die Minimaltemperatur weicht um 7.3 °C, die Maximaltemperatur um 2.1 °C vom Modell in EnergyPlus ab.

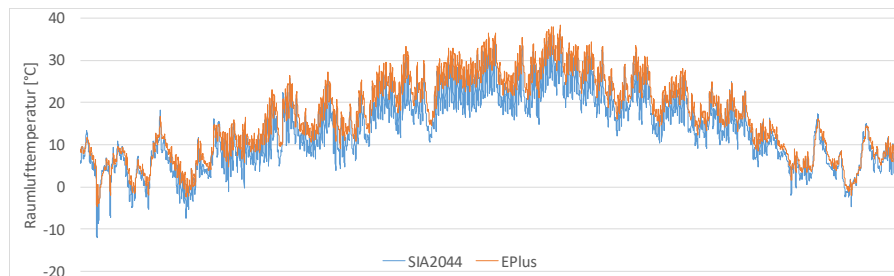


Abbildung 12: Verlauf der Raumlufthtemperatur eines ungedämmten Stahlbetonbaus (20 cm Beton) über ein Jahr als Vergleich zwischen dem Modell in Excel® nach SIA 2044:2011 und dem Modell in EnergyPlus.

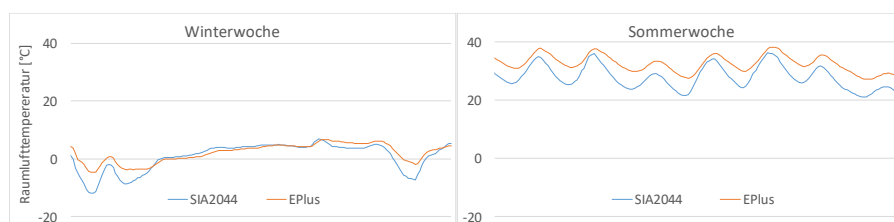


Abbildung 13: Verlauf der Raumlufthtemperatur eines ungedämmten Stahlbetonbaus (20 cm Beton) während einer Winter- und einer Sommerwoche im Vergleich zwischen dem Modell gemäss SIA 2044:2011 und EnergyPlus.

Bei einem mit 5 cm innen gedämmten Betonbau reduzieren sich die kumulierten Abweichungen auf knapp 11 %, aber die weniger gedämpften, täglichen Schwingungen des Modells nach SIA 2044:2011 bleiben bestehen (Abbildung 14). Die minimale Wintertemperatur nach SIA 2044:2011 liegt 5.7 °C tiefer.

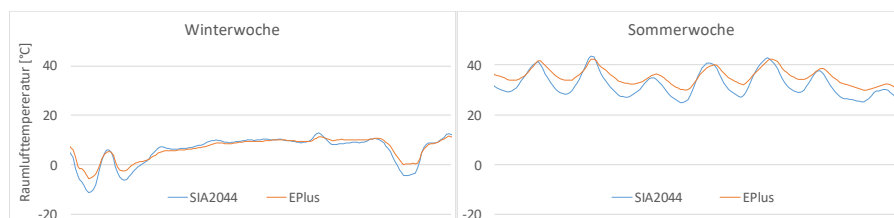


Abbildung 14: Verlauf der Raumlufthtemperatur eines mit 5 cm innen gedämmten Stahlbetonbaus während einer Winter- und einer Sommerwoche im Vergleich zwischen dem Modell gemäss SIA 2044:2011 und EnergyPlus.

Bei 5 cm Aussendämmung sinken die Abweichungen auf 7 %, bei nunmehr geringen Differenzen bei den Minimal- (0.5 °C) und Maximaltemperaturen (1.5 °C). Die Modelle zeigen aber immer noch leichte systematische Abweichungen.

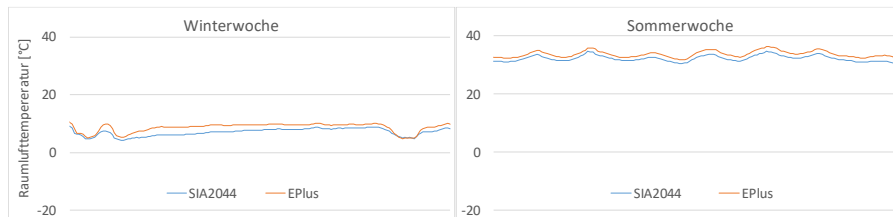


Abbildung 15: Verlauf der Raumlufttemperatur eines mit 5 cm aussen gedämmten Stahlbetonbaus während einer Winter- und einer Sommerwoche im Vergleich zwischen dem Modell gemäss SIA 2044 und EnergyPlus.

Erst bei einem Betonbau mit starker Aussendämmung (20 cm) reduzieren sich die Abweichungen der Minimal- und Maximaltemperaturen auf je 0.5 °C und die kumulierten Abweichungsbeträge sinken auf akzeptable 2.6 %. In diesem Fall ist auch eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe im Jahresverlauf (Abbildung 16) und in den repräsentativen Wochen zu erkennen (Abbildung 17).

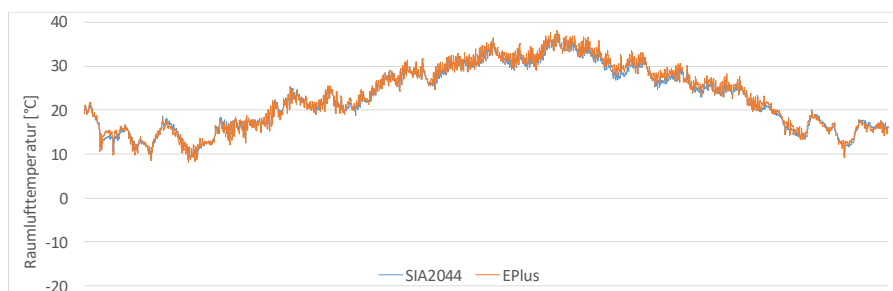


Abbildung 16: Verlauf der Raumlufttemperatur eines mit 20 cm aussen gedämmten Stahlbetonbaus über ein Jahr als Vergleich zwischen dem Modell in Excel® nach SIA 2044:2011 und dem Modell in EnergyPlus.

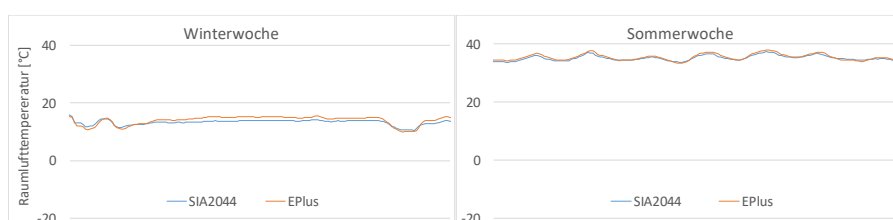


Abbildung 17: Verlauf der Raumlufttemperatur eines mit 20 cm gedämmten Stahlbetonbaus während einer Winter- und einer Sommerwoche im Vergleich zwischen dem Modell gemäss SIA 2044 und EnergyPlus.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Rechenmodell gemäss SIA 2044:2011 für ungedämmte oder nur leicht gedämmte Bauwerke (wie es BTG typischerweise sind und sein sollten) zu systematischen Fehlern bei der resultierenden Raumlufttemperatur führt. Die Abweichungen dürften auf die gemäss SIA 2044:2011 stark vereinfachte Berücksichtigung der thermischen Masse der Gebäudehülle zurückzuführen sein²³. Diese Modelle sollten daher nicht für die Dimensionierung der Wärmedämmung eingesetzt werden. Das Excel®-Modell

²³ Im Modell nach SIA 2044 wird die gesamte thermische Masse des Raumes zu einem Knotenpunkt zusammengefasst und als eine zentrale Massetemperatur modelliert. Bei starker Aussendämmung spielt die darunterliegende Masse eine weniger relevante Rolle.



nach SIA 2044:2011 mit hoher zeitlicher Auflösung hat dort eine Berechtigung, wo einfache Zugänglichkeit und Ergebnisauswertung wichtig sind, z.B. für vergleichende Untersuchungen von Gebäudetechnikvarianten oder bei der Regelung. Die systematischen Abweichungen der Raumtemperaturen sind bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen

Im Sommer 2019 wurde das SIA Merkblatt 2044 in Form der SIA 2044:2019²⁴ neu aufgelegt, wobei unter anderem auch eine detailliertere Modellierung der thermischen Speichermasse²⁵ eingeflossen ist. Diese Anpassungen konnten im vorliegenden Projekt aus zeitlichen Gründen nicht mehr nachvollzogen werden. Die festgestellten Abweichungen bei nicht oder schwach gedämmten Gebäuden haben Auswirkungen auf den berechneten Strombedarf für Lüftung und Kühlung im BTG. Für die folgenden Auswertungen wurden daher ausschliesslich Ergebnisse aus dem Modell in EnergyPlus verwendet.

²⁴ <http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/sia%202044/d/2019/D/Product>

²⁵ Neu fünf Knoten statt nur einem.



3.4 Charakterisierung des exemplarischen BTG

Zur Analyse von möglichen Massnahmen wurde ein repräsentatives BTG ausgewählt und zur Prüfung des Nutzens von möglichen Effizienzmassnahmen in der dynamischen Simulationsumgebung abgebildet.

Für die Modellierung wurde das BTG am Bahnhof Netstal an der SBB-Linie Ziegelbrücke Ost - Lintthal verwendet. Es handelt sich um ein modernes, modulares Gebäude in der vorfabrizierten Premoco-Modulbauweise²⁶ mit Baujahr 2016 (Abbildung 18)). Von diesem und ähnlichen Gebäudetypen sind in der gesamten Schweiz dutzende Objekte vorhanden und es werden laufend alte BTG durch Neubauten ersetzt.



Abbildung 18: Aussenansicht des modellierten BTG «Netstal» (oben) mit Details zum Fundament (unten links) und Aufbau der Aussenwand (unten rechts). Quelle: SBB

Das exemplarische BTG umfasst im Modell²⁷ 122.3 m² Nettogeschossfläche bei 3.2 m lichter Geschosshöhe (ab Oberkante Doppelboden). Das reale BTG ist mittels Leichtbauwand in zwei in etwa gleich grosse Bereiche unterteilt: Einen SA-Bereich mit dem Stellwerk sowie einen N-/USV-Raum mit USV-Anlage, Batterien, Elektroinstallationen sowie den HLK-Anlagen (Lüftung, Klimakälte). Diese

²⁶ Premoco System AG, Sarnen

²⁷ Aus Gründen einer Vereinheitlichung verschiedener Modelle wurden im Projektverlauf die Ausmasse des originalen BTG «Netstal» unter Wahrung der realen, spezifischen Lasten und Luftmengen leicht vergrössert.

Unterteilung wurde im Modell nicht berücksichtigt, da mit der zentralen Lüftungs- und Kälteanlage keine unterschiedlichen Raumanforderungen realisierbar sind.

Das BTG ist in Elementbauweise erstellt und ruht auf einem rundumlaufenden Streifenfundament aus Beton²⁸. Die tragende Struktur besteht aus 20 cm starken Betonprofilelementen mit 5 cm Innenwärmedämmung sowie einer Verkleidung mit Gipskartonplatten. Durch diese Konstruktion ergibt sich an den Außenwänden und am Dach ein statischer²⁹ U-Wert von $0.51 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Zwischen der Bodenplatte mit einem U-Wert von $1.54 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und dem Erdreich ist zwischen den Fundamentstreifen ein ruhender Luftraum³⁰ vorhanden. Der Hohlboden (60 cm mit Metallstützen) dient der Kabelführung im Zwischenraum, wurde im Modell aber nicht modelliert.

Die Technikflächen werden im realen BTG durch eine gemeinsame, zentrale Lüftungsanlage mit Direktverdampfer-Kältekompressor bedient (Abbildung 19). Der Rückkühler des Kälteaggregats befindet sich auf dem Dach. Die gekühlte Zuluft wird über Lüftungskanäle in die Zone transportiert und in Bodenhöhe eingeblasen. Die durch interne Lasten erwärmte Abluft wird an der gegenüberliegenden Wand unter der Decke abgezogen. Die Regelung der Zuluftmenge und des Betriebszustands erfolgen gemäss dem Temperaturmesswert des Raumthermostats des kritischen Raumes – es werden demnach immer beide Nutzungen gleichbehandelt. Es gibt keine ansteuerbaren Regelventile für die Zuluft der Teilzonen. Die maximale Luftmenge liegt bei einem 9.5-fachen Luftwechsel pro Stunde³¹, die installierte, mechanische Kälteleistung bei knapp 200 W/m^2 .

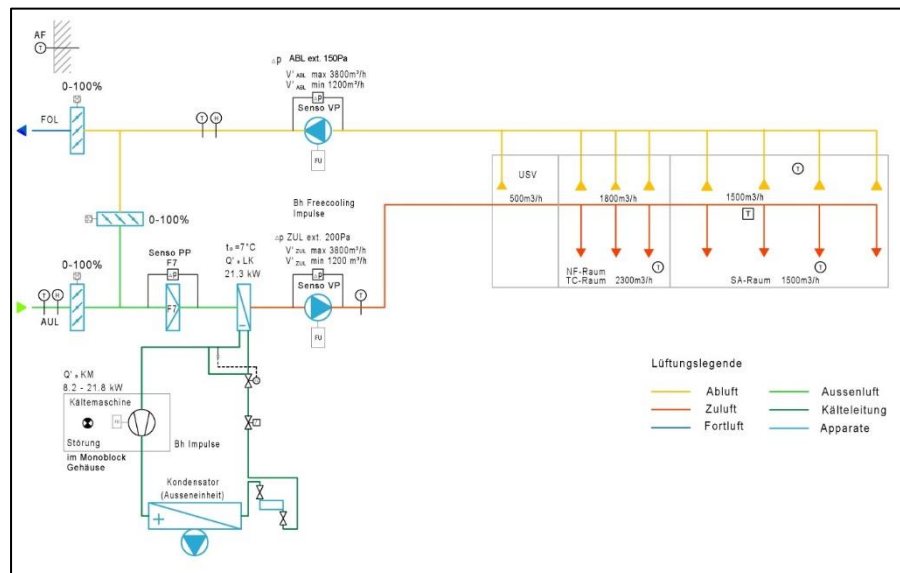


Abbildung 19: Lüftungs- und Kälteschema des BTG «Netstal». Quelle: SBB

²⁸ Modellierung mittels Foundation:Kiva Element (zweidimensionaler Wärmetransfer aus dem Erdreich) in EnergyPlus.

²⁹ Im Simulationsmodell werden die Wärmeflüsse durch die Bauteile dynamisch betrachtet, d.h. inkl. Berücksichtigung der Effekte der thermischen Speichermasse. Der statische U-Wert dient lediglich zu Vergleichszwecken.

³⁰ Modellierung als stehende Luftschicht in EnergyPlus.

³¹ Inkl. Luftvolumen des Hohlbodens.

Die Lüftungs- und Klimakälteanlage mit deren Regelung unterstützen einen Umluftbetrieb sowie Free Cooling über Aussenluft. Die Lüftungsantriebe sind zwischen ca. 30 % und 100 % der Luftmenge regelbar. Die Kompressorkältemaschine ist mittels Frequenzumformer auf eine fixe Zulufttemperatur von typischerweise 12 °C bis 15 °C geregelt. Es gibt neben dem Auszustand drei Betriebszustände:

- Periodische Spülung. Betrieb bei minimaler Luftmenge für 5 min alle 3 h. Sicherstellung der minimalen Zulufttemperatur von 8 °C über einen Umluftanteil bis 75 %.
- Free Cooling (Kühlung über Aussenluft). Die Luftmenge wird proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Aussen- und Innenraumtemperatur geregelt (bei 15 K nur 30 %, bei 2 K volle 100 %). Eine minimale Zulufttemperatur von 8 °C wird über anteilige Umluftbeimischung bis max. 75 % sichergestellt.
- Mechanische Kühlung. Regelung des Frequenzumformers des Kompressors auf die eingestellte Zulufttemperatur bei konstant 100 % Luftmenge, Umschaltung in den Umluftbetrieb falls die Enthalpie der Aussenluft höher ist als diejenige der Abluft.

Die Ein- und Ausschaltpunkte der Modi sind programmierbar und liegen typischerweise für das Free Cooling bei rund 25 °C und für die mechanische Kühlung bei rund 28 °C Raumtemperatur. Dies gilt für den Raumtemperatursollwert von 28 °C.

Von diesem Objekt sind gemessene Lastverläufe des Stromverbrauchs an der Hauptverteilung sowie an der USV verfügbar. Zudem ist das Objekt mit diversen Grössen der Lüftungs- und Klimaanlage über das Gebäudeleitsystem der SBB (GLS CH) auch online abgebildet.

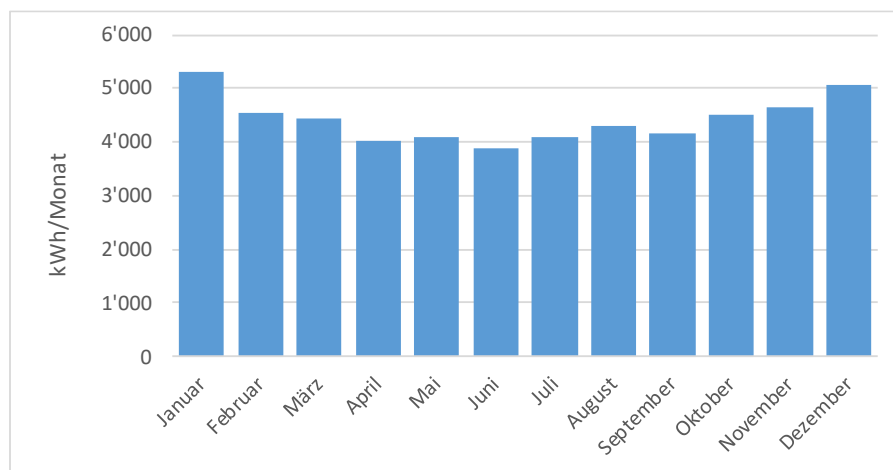


Abbildung 20: Monatlicher Stromverbrauch ab 50-Hz-Netz des BTG «Netstal» im Jahr 2018.
Quelle: tb Glarus

Das BTG wird mit 50-Hz-Strom ab Netz der Technischen Betriebe (tb) Glarus versorgt. Der gesamte Stromverbrauch³² im Jahr 2018 lag bei 53'060 kWh und

³² Dies ist der durch den Netzbetreiber gemessene und abgerechnete Strombedarf mit 50 Hz des BTG am Netzanschlusspunkt. Dieses BTG verfügt über keine 16.7 Hz-Einspeisung.



einer monatlichen Verteilung gemäss der Abbildung 20. Dieser Strombedarf umfasst sowohl die im BTG installierten Geräte und Anlagen als auch ausserhalb des BTG befindliche Verbraucher. Der Stromverbrauch und die Abwärmelasten des BTG «Netstal» werden im Abschnitt 4.2 näher analysiert.

4. ANALYSE UND ERKENNTNISSE

4.1 Raumanforderungen

4.1.1 Raumsolltemperaturen

Sowohl ein Ausfall als auch Austauschmassnahmen haben bei Bahninfrastrukturanlagen grosse Kostenfolgen, weil in vielen Bereichen zertifizierte Bauteile eingesetzt werden müssen. Insofern unterscheiden sich elektronische Stellwerkkomponenten bei Bahnunternehmen von konventioneller Serverinfrastruktur – sie werden für deutlich längere Lebensdauerzyklen von rund 40 Jahren konzipiert. Da bei vielen elektronischen Komponenten die Lebensdauer bei hoher Raumtemperatur überproportional stark abnimmt, kommt mit dem Siegeszug der elektronischen Stellwerke auch einer innerhalb relativ enger Bereiche aktiv geregelten Raumtemperatur eine zunehmend wichtige Rolle zu. Die Raumsolltemperaturen im BTG orientieren sich somit an der Sicherstellung des zuverlässigen Betriebs und einer angemessenen Lebensdauer der elektronischen Stellwerkkomponenten.

Aktuell geltende Richtwerte für Sicherungsanlagen (SA) der SBB geben einen Normalbereich im Stellwerk von zwischen 7 °C und 28 °C mit einer Toleranz von ± 2 °C vor³³. Als Extremwerte werden bis 35 °C während 50 h pro Jahr toleriert, sowie bis 2 °C Minimaltemperatur während 100 h pro Jahr. Batterien in separaten Räumen haben noch engere Vorgaben: Im Normalbereich werden 10 °C bis 22 °C toleriert, bei denselben Extremwerten wie bei den SA.

Gegenwärtig befinden sich die Vorgaben betreffend Raumsolltemperaturen in Diskussion, weil mit tieferen Sollwerten eine längere Lebensdauer der elektronischen Stellwerkkomponenten bis 40 Jahre sichergestellt werden soll. Neue Sollwerte um 22 °C (mit zeitweisen Überschreitungstoleranzen von ± 2 °C) sind bei den SBB in Diskussion. Bei den RhB sind ähnliche Anforderungen bereits gültig: 22 °C Raumsolltemperatur in NT-Räumen mit Batterien³⁴. **Die Entwicklung hin zu elektronischen Stellwerken könnte zukünftig also vermehrt zu aktiv gekühlten Technikräumen führen, welche um 22 °C Raumtemperatur betrieben werden.**

Die Auswirkungen auf den Energiebedarf einer Senkung der Raumsolltemperatur von 28 °C auf 22 °C sind beträchtlich. **Am Modell mit bestehender Regelung der HLK-Systeme³⁵ ergibt sich ein mehr als doppelter Strombedarf für Lüftung und Klimakälte beim Sollwert von 22 °C gegenüber 28 °C (Abbildung 21).**

³³ Regelwerk SBB, I-50200, Gebäude für Bahntechnik: Raumkonditionen und Kühlleistungen. Internes Dokument, gültig ab 1.8.2017.

³⁴ Regelwerk RhB, BS 14192, EA-NT und EA-KA Raum: Projektierungs- und Ausführungsrichtlinien. Internes Dokument, gültig ab

³⁵ Betonbau mit 5 cm Innendämmung, Klima Zürich, 9.5-facher Luftwechsel, bestehende Regelung, EER der Kältemaschine 3. 28 °C Raumsollwert: Free Cooling ab 24.5 °C Raumtemperatur, mech. Kühlung ab 28 °C Raumtemperatur (Zulufttemperatur 15 °C). 22 °C Raumsollwert: Free Cooling ab 18.5 °C Raumtemperatur, mech. Kühlung ab 21.5 °C Raumtemperatur (Zulufttemperatur 12 °C).

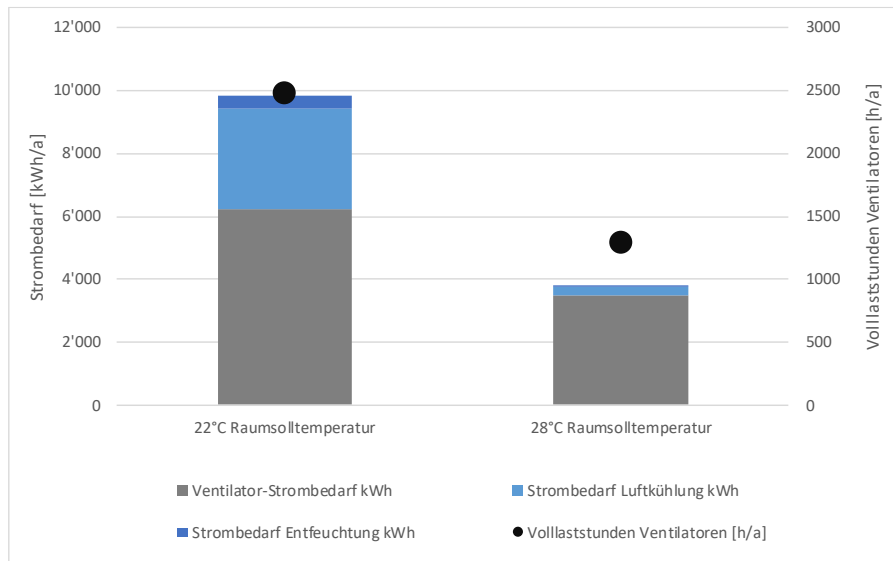


Abbildung 21: Auswirkung einer Senkung der Raumsolltemperatur von 28 °C auf 22 °C auf den Strombedarf der Lüftung und Kühlung.

Der Mehrverbrauch resultiert dabei hauptsächlich durch den häufigeren Betrieb der Lüftungsventilatoren (Abbildung 21, schwarze Punkte, rechte Achse) und den reduzierten Anteil an Free Cooling und Auszustand der Lüftung (Abbildung 22).

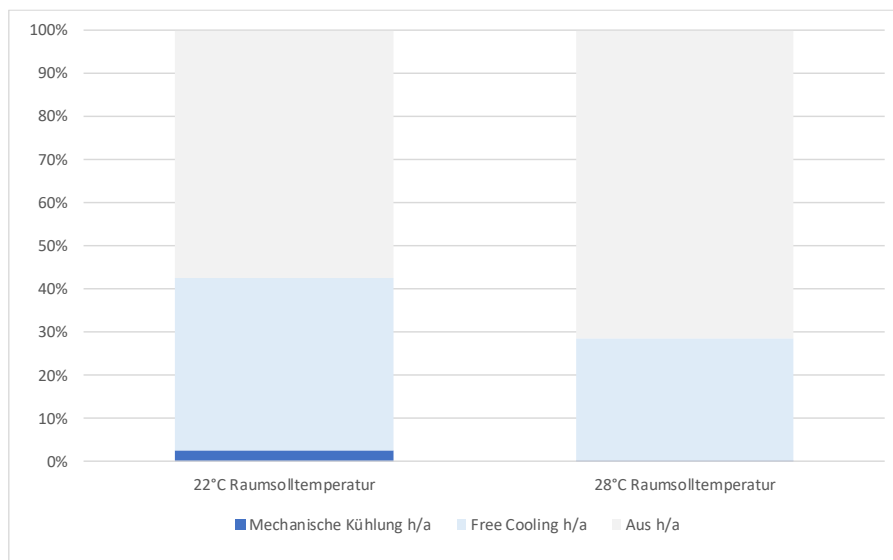


Abbildung 22: Häufigkeit der Betriebszustände der Lüftung und Kühlung im BTG während einem Jahr bei 22 °C und 28 °C Raumsolltemperatur.

4.1.2 Luftwechselrate

Typischerweise sind in den BTG keine ständigen Arbeitsplätze vorhanden. Dadurch besteht grundsätzlich kein Bedarf, die Lüftungs- und Klimaanlage nach den menschlichen Komfortansprüchen betreffend Temperatur und CO₂-Gehalt auszurichten, sondern nach dem Kältebedarf.

■

Bei den SBB wird bei Technikräumen (ausser Batterieräumen) im Minimum ein einfacher Luftwechsel pro Stunde vorgegeben³⁶. Dies entspricht in etwa dem hygienischen Luftwechsel in einem Büro, hat aber keinen Bezug zur effektiv aus dem Raum abzuführenden Wärmelast. Ein unnötig hoher Luftwechsel in Zeiten, in denen gar kein Kältebedarf besteht, führt zu stark erhöhtem Stromverbrauch durch die Lüftungsantriebe (vgl. Abschnitt 4.4.2). **Auf einen pauschalen Minimalluftwechsel ist im BTG zu verzichten.**

Bei Batterieräumen wird ein einfacher Luftwechsel pro Tag gefordert³⁶. Die herkömmlich in USV-Anlagen oft eingesetzten Blei-Säurebatterien weisen im Ladebetrieb geringfügige Wasserstoff- und Sauerstoffemissionen auf, welche durch kontinuierlichen Luftwechsel abgeführt resp. ausreichend verdünnt werden müssen. Der erforderliche Luftwechsel für stationäre Batterien hängt von der Zellenzahl und den Ladeströmen ab und kann anhand dieser Grössen für das vorliegende Zellpaket berechnet werden. Bei typischen USV-Anlagen von BTG liegt der nötige Luftwechsel im Bereich von wenigen m³/h. In der Praxis wird dies häufig durch einen nicht-kontinuierlichen Spülbetrieb sichergestellt. **Durch die vermehrte Anwendung alternativer Batterietypen (Lithium-Ionen, Salz-batterien) ohne Ausgasungsproblematik sind die pauschalen Luftwechselerfordernisse für Batterieräume zu hinterfragen.**

4.1.3 Raumluftheuchtigkeit

Bei den Bahnunternehmen bestehen Anforderungen zur relativen Luftfeuchtigkeit im BTG. Für die Feuchte wird bei den SBB ein Bereich zwischen 20 % und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit angegeben, bei den RhB soll die relative Luftfeuchtigkeit 50 % (bei 25 °C) nicht übersteigen.

Da im BTG typischerweise keinerlei interne Feuchtequellen vorhanden sind, liegt die absolute Raumluftheuchte im BTG in aller Regel unterhalb derjenigen des Aussenklimas. Allerdings bestehen in der Regel auch keine technischen Möglichkeiten, die Feuchtigkeit gezielt zu beeinflussen, da weder eine Entfeuchtungsregelung bei den Klimageräten noch eine Zuluftbefeuchtung vorgesehen sind. **Somit ist fragwürdig, ob eine Vorgabe zur Feuchte sinnvoll ist.**

Bei mit mechanisch gekühlter Zuluft versorgten Räumen kommt es in Abhängigkeit der eingeregelter Zulufttemperatur und den Konditionen der Aussenluft automatisch zu einer gewissen (nicht kontrollierbaren) Entfeuchtung am Kälteregister in der Zuluft³⁷. **Diese Entfeuchtung ist aus energetischer Sicht nicht erwünscht, da die investierte, latente Kühlleistung im Raum nicht nutzbar ist und den Strombedarf des Kältesystems erhöht.** Die Zulufttemperatur bei mechanischer Kühlung mit Aussenluft bestimmt den Energiebedarf für diese Entfeuchtung – je höher die Zulufttemperatur, desto weniger Entfeuchtung findet statt. Im Gegenzug muss allerdings bei höherer Zulufttemperatur auch mehr Luft umgewälzt werden, um eine bestimmte Kälteleistung im Raum zu erreichen, was zusätzliche Ventilatorenergie verbraucht. Dieser Aspekt wird im Abschnitt 4.4.3 näher analysiert.

³⁶ Regelwerk SBB, I-50200, Gebäude für Bahntechnik: Raumkonditionen und Kühlleistungen. Internes Dokument, gültig ab 1.8.2017.

³⁷ Bei Umluftkühlung tritt dieser Effekt nicht auf, wenn keine internen Feuchtequellen vorhanden sind.

4.2 Interne Lasten in der Praxis

Um die HLK-Systeme in einem BTG passend dimensionieren zu können, sind Kenntnisse der später real anfallenden internen Wärmelasten notwendig. Die Recherchen im Rahmen dieses Projekts haben gezeigt, dass solche Daten in der Planungsphase häufig nicht vorliegen. Die teils bekannten, elektrischen Anschlussleistungen von elektronischen Komponenten im BTG sind in der Regel nicht geeignet, um die effektive Abwärmelast zu ermitteln, weil die reale Auslastung im Betrieb nur schwer einzuschätzen ist.

Im Rahmen dieses Projekts wurden gemessene, elektrische Bezugsleistungen realer BTG ermittelt, ausgewertet und interne von externen Verbrauchern abgegrenzt. Dies erlaubt es, reale interne Abwärmelasten innerhalb der Gebäudehülle des BTG zu ermitteln und mit den Auslegungswerten zu vergleichen. Diese Daten können in Zukunft verwendet werden, um die flächenspezifischen Auslegungswerte zu bereinigen und an die Realität anzupassen.

4.2.1 Interne und externe Lasten

Bei den SBB sind diverse BTG-Standorte mit online aufgeschalteten Energiezählern am Eingang der Hauptverteilung (HV) sowie am Abgang zur USV der Sicherungsanlagen ausgerüstet, welche den elektrischen Leistungsbezug zeitlich detailliert erfassen und über einige Tage bis Monate speichern. An der HV sind neben der USV der Sicherungsanlagen auch eine kleinere USV für Telekom-Anlagen, Beleuchtung und Steckdosen im BTG sowie der Kompressor und der Rückkühler der Kältemaschine angeschlossen. Auch BTG-externe Verbraucher wie eine Notheizung im Anschlusskasten oder Bahnhofinfrastruktur (Beleuchtung, Automaten) laufen je nach Standort über die HV des BTG. Über das Messgerät der USV wird der Verbrauch des Stellwerks, der Signalanlagen, der Ventilatoren der Lüftung und der HLK-Steuerung erfasst. In der Abbildung 23 ist die schematische Topologie der Messungen und Verbraucher im BTG abgebildet.

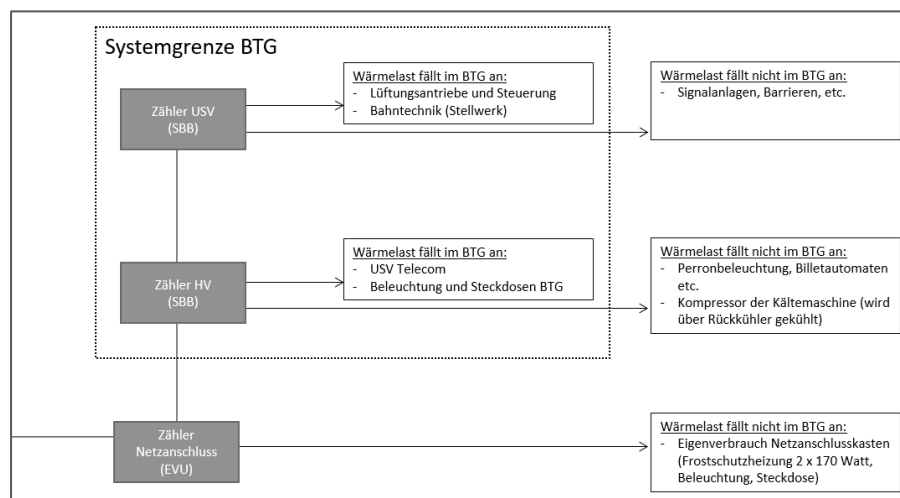


Abbildung 23: Abgrenzung der im BTG und ausserhalb des BTG anfallenden Elektroverbräuche zur Abschätzung der effektiven Wärmelasten im BTG.

Nicht alle an HV und USV gemessenen Verbraucher sind zur Bestimmung der intern anfallenden Abwärmelasten relevant. Einige Verbraucher befinden sich ausserhalb der Gebäudehülle des BTG und generieren damit im BTG keine Abwärme, welche über die HLK-Systeme abgeführt werden muss. Dies sind Signalanlagen, Bahnhofinfrastruktur sowie der Kompressor der Kälteanlage, welcher primär durch den Rückkühler gekühlt wird³⁸. Diese Verbräuche sind zur Bestimmung der effektiven, internen Lasten abzugrenzen.

Die Analyse des Elektroverbrauchsprofils des BTG «Netstal» am Netzanschlusspunkt zeigt anhand von Daten des gesamten Jahres 2018, dass sich der Leistungsbedarf ganzjährig zwischen ca. 3 kW und 10 kW bewegt (Abbildung 24). Es gibt zwei häufig vorkommende Lastbereiche: Zwischen 3 und 5 kW (ca. 4'000 h/a) und zwischen 6.5 und 8.5 kW (ca. 4'300 h/a). Mit diesen Bereichen sind 95% der Jahresbetriebszustände abgedeckt. Der Energiebezug ab Netz beträgt rund 53'000 kWh/a (vgl. Abbildung 20 auf Seite 46).

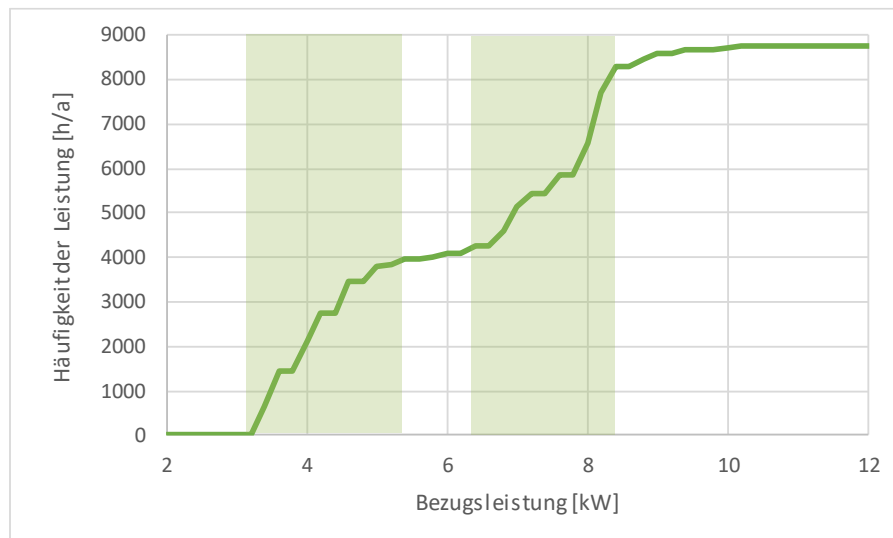


Abbildung 24: Summenhäufigkeit der gemessenen Strombezugslasten am Netzanschlusspunkt des BTG «Netstal» über das gesamte Jahr 2018. Besonders häufig vorkommende Leistungsbereiche sind grün hinterlegt. Quelle: SBB

In der zeitlichen Auflösung wird deutlich, dass es ein täglich wiederkehrendes Verbrauchsmuster gibt (Abbildung 25), welches an der HV in Abhängigkeit der externen Verbraucher (wie Bahnhofsinfrastruktur) schwankt (nachts mehr Beleuchtung, nach Betriebsschluss weniger) und im Fall von «Netstal» tagsüber sehr nahe am Verbrauch der USV liegt. Der Bedarf der USV der Telekom-Anlagen, welcher zwar eine BTG-interne Last ist, aber über die HV läuft (vgl. Abbildung 23), kann damit keine entscheidende, interne Abwärme sein.

³⁸ Bei einem Kompressor fliesst praktisch der gesamte, bei der Kompression aufgewendete Strom als Wärme in das Kältemittel, welches über den Rückkühlkreislauf im Freien wieder abgekühlt wird. Im Raum selber fällt wenig Abwärme an.

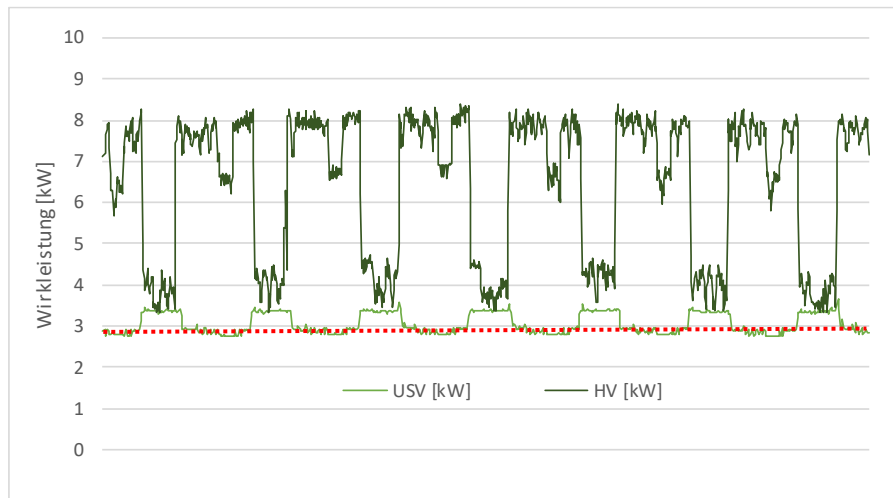


Abbildung 25: Verlauf der gemessenen Strombezugslasten an der HV und an der USV der Sicherungsanlagen im BTG «Netstal» in der ersten Januarwoche 2019, Start 0:00 Uhr. Rot gepunktet: Bandlast, entsprechend den internen Wärmequellen. Quelle: SBB

Der Verbrauch an der USV ist tagsüber etwas höher, weil dann die Signalanlagen aufgrund des Tageslichts stärker beleuchtet werden müssen. Die Signale sind allerdings keine BTG-interne Wärmequelle.

Der häufige Lastbereich von 3 bis 5 kW in der Abbildung 24 kann in der Abbildung 25 dem Tagesbedarf ab HV (dunkelgrüne Linie) zugeordnet werden, der Lastbereich von 6.5 bis 8.5 kW der nächtlichen Last. Der jährliche Strombedarf ab USV der SA liegt in «Netstal» bei rund 55 % des Verbrauchs am Netzanschlusspunkt.

Im Sommer ist der Verbrauch an der USV durch die erhöhte Lüftungsrate erhöht (Abbildung 26). Die BTG-intern anfallende Abwärme dürfte im Sommer aber nur minimal höher sein, da auch die Abwärme des Abluftventilators sowie der Bedarf für die im Sommer länger zu beleuchtenden Signale nicht im BTG anfallen.

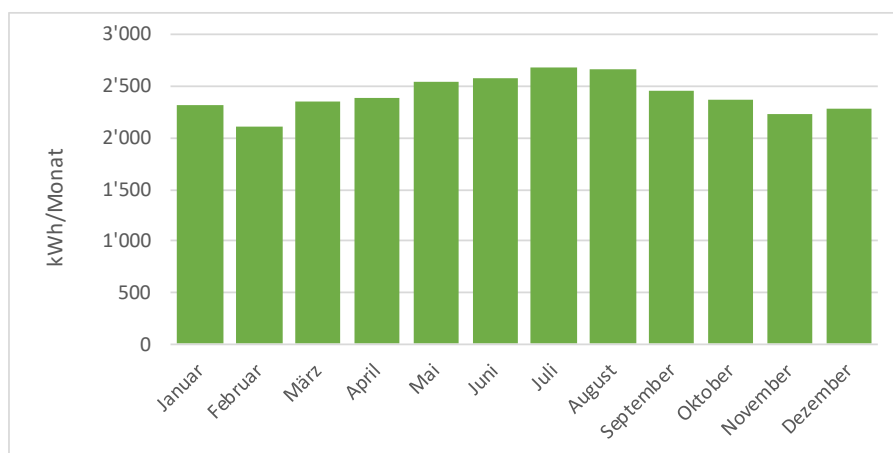


Abbildung 26: Monatlicher Strombedarf ab USV der SA im BTG «Netstal» im Jahr 2018.

Es kann daher von einer im BTG anfallenden, relativ konstanten internen Abwärmelast über das ganze Jahr ausgegangen werden. Die nachts auftretende

Bandlast an der USV der Sicherungsanlagen umfasst zwar immer noch gewisse, ausserhalb des BTG auftretende Verbraucher (Signale, Barrieren, Abluftventilator), stellt aber die beste, verfügbare Annäherung an die effektiven, innerhalb der Gebäudehülle des BTG anfallenden Abwärmelasten dar. Diese Schlussfolgerung konnte am BTG «Näfels» bestätigt werden, wenngleich dort die externen Verbraucher (Bahnhofinfrastruktur) deutlich höher sind. Weitere BTG sind nicht mit diesem Detailgrad an Messdaten verfügbar.

In der Folge wurde bei weiteren BTG die Bandlast an der USV der Sicherungsanlagen ausgelesen, ausgewertet und mit Auslegungsdaten der Kältesysteme verglichen (Tabelle 5). Die Bandlast an der USV der Sicherungsanlagen wurde der Auslegung der Kühlleistung gegenübergestellt. Vier der ausgewählten BTG waren in Premoco-Bauweise (wie «Netstal») ausgeführt, und alle Standorte verfügten über zwischen 78 m² und 167 m² Nettogeschossfläche (NGF).

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen, elektrischen Bandlast an der USV der SA im Vergleich zur Auslegung der Kühlleistung. NGF: Nettogeschossfläche. GLS-CH: Gebäudeleitsystem der SBB. Quelle: SBB AG

Standort	Premoco	NGF m ²	Auslegung Klimakälte		Gemessen El. Bandlast*		Abweichung Gemessen vs. Auslegung	Kommentar
			kW	W/m ²	kW	W/m ²	%	
Brugg		118.1	17.0	143.9	14.9	126.1	12%	Altbau
Othmarsingen		153.4	16.1	105.0	10.0	65.2	38%	
Hendschiken		167.2	15.0	89.7	6.1	36.5	59%	
Aarburg-Oftringen		144.4	12.0	83.1	5.6	38.8	53%	
Frauenfeld		142.6	14.1	98.9	4.9	34.4	65%	
Pfäffikon SZ		108.8	18.0	165.4	16.0	147.1	11%	Altbau
Elgg	X	105.5	19.2	182.0	4.5	42.7	77%	
Netstal	X	105.5	20.7	196.3	2.8	26.5	86%	
Näfels	X	123.6	24.4	197.5	3.0	24.3	88%	
Salez	X	78.0	10.0	128.2	3.1	39.7	69%	

* Durchgehend auftretende Bandlast, abgelesen über das GLS-CH

Die spezifische, installierte Kälteleistung liegt bei den zehn Standorten zwischen 83 W/m² und 198 W/m², was innerhalb der Richtwerte von 50-200 W/m² gemäss den Raumanforderungen der SBB liegt (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die dauerhaft an der USV der SA anliegende Bandlast (als Indikator für die im BTG anfallende Abwärme) liegt je nach Standort zwischen 2.8 kW und 16 kW. **Der Vergleich der spezifischen, installierten Kälteleistung mit der effektiven, spezifischen internen Abwärmelast zeigt, dass die interne Last zwischen 12 % und 88 % unter der Auslegungslast liegt** (Abbildung 27).

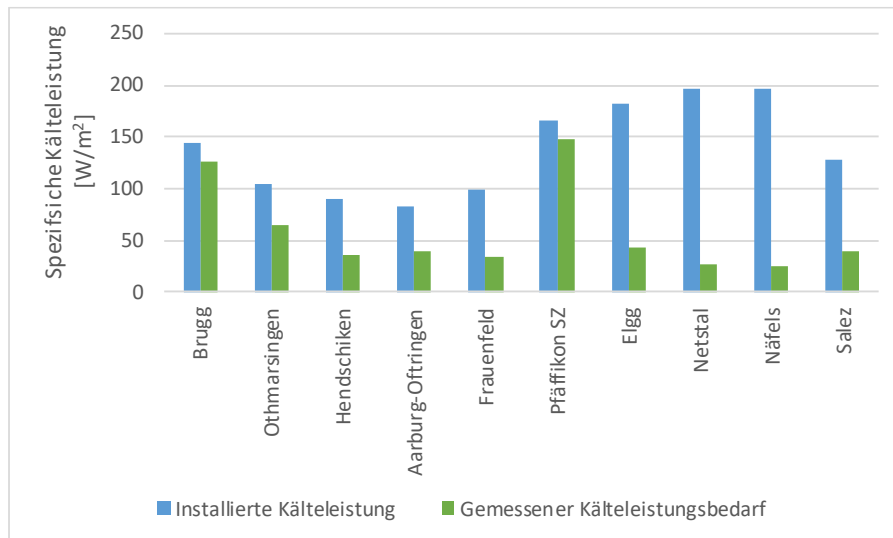


Abbildung 27: Vergleich der installierten und der effektiv erforderlichen Kälteleistung in 10 BTG.

Im Fall des BTG «Netstal» bedeutet dies, dass rund 7 Mal mehr Kälteleistung im BTG installiert ist, als effektiv benötigt wird. Dies hat Konsequenzen für die Effizienz der HLK-Anlagen, weil stark überdimensionierte Lüftungs- und Kälteanlagen ausserhalb des Regelbereichs der Ventilatorantriebe und Verdichter arbeiten, somit häufig takten und mehr Strom verbrauchen (vgl. Abschnitt 4.4.2). Bei zwei Altbauten stimmt die installierte Leistung sehr gut mit der benötigten Leistung überein.

4.2.2 Flächen- und Leistungsreserven

Wartung und Ersatz von Stellwerken müssen im laufenden Betrieb stattfinden. Dies kann entweder durch einen Neubau in der Nähe, oder durch Vorsehen entsprechender Flächen- und Leistungsreserven (Energieversorgung, Kühlung) in einem bestehenden Raum erreicht werden, damit parallel zum Betrieb des bestehenden Systems ein neues daneben aufgebaut und in Betrieb genommen werden kann. Die im Rahmen dieses Projekts analysierten Standorte zeigten, dass typischerweise bei neuen BTG vor diesem Hintergrund in der Praxis grosszügige Flächenreserven erstellt werden.

In der Konsequenz werden auch die Kühl- und Lüftungssysteme implizit auf den parallelen Betrieb von zwei Stellwerken ausgelegt, weil für die Dimensionierung grundsätzlich flächenspezifische Richtwerte gelten. Der Richtwert für die Dimensionierung der maximal verfügbaren Kühlleistung in Bahntechnikräumen bei den SBB liegt bei 50-200 W/m².³⁹ Die grosse Bandbreite des Richtwerts zeigt, dass kaum eine allgemeingültige Vorgabe zur Dimensionierung der Lüftungs- und Kälteanlagen möglich ist und stattdessen, je nach Ausstattung des Raums, individuelle Berechnungen und Auslegungen notwendig sind. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass in der Planungsphase die nötigen Informationen zur internen Wärmelast im realen Betrieb kaum verfügbar sind und sich aufgrund der

³⁹ Regelwerk SBB, I-50200, Gebäude für Bahntechnik: Raumkonditionen und Kühlleistungen. Internes Dokument, gültig ab 1.8.2017.



Anschlussleistungen der verbauten Gerätschaften auch nicht zuverlässig abschätzen lassen.

Am Beispiel des modellierten BTG «Netstal» sowie zwei weiteren BTG («Elgg» und «Näfels») zeigte sich, dass in der Praxis mit 165-200 W/m² auch tatsächlich am oberen Bereich des Richtwerts Kälteleistung installiert wird. Die Flächenreserven sind beträchtlich und damit auch die vorgehaltenen Kühlleistungen und Luftwechselraten. Diese Reserven stehen einem optimalen Betrieb der HLK-Anlagen entgegen, weil die wichtigsten Komponenten (Lüftungsantriebe, Kältemaschinen) nur einen beschränkten Regelbereich aufweisen und ein taktender Betrieb im Normalfall nicht erwünscht ist.

Es ist zu hinterfragen, ob es sich bei der Erstinstallation von BTG tatsächlich lohnt, für die Flächenreserven bereits Kühl- und Lüftungsleistung vorzuhalten. In Anbetracht der langen Lebensdauer der Stellwerkkomponenten (bis 40 Jahre) und der kürzeren Lebensdauer von HLK-Systemen (ca. 20 Jahre) scheint es sinnvoller, die HLK-Technik auf den aktuell erforderlichen Bedarf auszulegen und erst bei Bedarf (z.B. Stellwerkerneuerung) die nötige HLK-Leistung bereitzustellen. Für kurzzeitigen Mehrbedarf können auch mobile Kältelösungen genutzt werden.



4.3 Optimierung der Gebäudehülle von Technikräumen

Technikräume wie BTG sind typischerweise Nutzungen mit ganzjährig relativ konstant hoher, flächenspezifischer Abwärmeleistung (vgl. Abschnitt 4.2). Die Abführung dieser Abwärme über die Lüftung und Klimatisierung sowie (passiv) über die Gebäudehülle ist eine essentielle Funktion der Infrastruktur des BTG, ohne die ein zuverlässiger Betrieb nicht möglich wäre. Die Gebäudehülle muss neben dem Schutz der technischen Anlagen vor Wasser und Schmutz unter anderem auch Schutz vor unbefugten Eingriffen bieten, behindert aber während einem grossen Teil des Jahres einen effizienten Abtransport der Abwärme.

Unter diesen Umständen sollte die Gebäudehülle so optimiert werden, dass möglichst wenig Energiebedarf für die Kühlung der darin befindlichen Anlagen entsteht. Bei modernen Rechenzentren wird diese Effizienz als Power Usage Effectiveness (PUE) dargestellt: Der PUE ist das Verhältnis des Stromverbrauchs des gesamten Rechenzentrums (inkl. allen Nebenverbrauchern wie Kühlung, Stromwandlung etc.) und dem Stromverbrauch der IT-Hardware. Ein PUE um 1.2 gilt als hocheffizient⁴⁰ und bedeutet, dass rund 20 % der für die Serverinfrastruktur aufgewendeten Energie zusätzlich für die Kühlung und weitere Nebenverbraucher benötigt werden. Im Fall des an der Realität kalibrierten Modells⁴¹ des BTG «Netstal» beträgt der Stromverbrauch der Lüftung und Kühlung bei 28 °C Raumsolltemperatur rund 3'600 kWh/a bei total 28'400 kWh/a interner Abwärme, was einem «PUE» von 1.13⁴² entspricht. Bei 22 °C Raumsolltemperatur sinkt dieser Wert auf 1.26. Diese Werte legen nahe, dass sich die Lüftung und Kühlung im exemplarischen BTG bereits auf einem effizienten Stand befindet.

Die Effizienz der Klimakühlung im BTG ist (neben dem Standort, welcher in der Regel kaum beeinflussbar ist, vgl. Abschnitt 4.3.2) im Wesentlichen davon abhängig a) wie viel Kühlung passiv über die Gebäudehülle erbracht werden kann, und b) wie viel die freie Kühlung mit Aussenluft beiträgt und c) wie gut die Regelung den effektiven Bedarf kennt und den richtigen Modus wählt. Der Punkt a) kann optimiert werden, in dem die Materialisierung und damit die Wärmedämmung und die thermische Speichermasse so optimiert werden, dass es im Winter nicht zu kalt wird (Frostschutz) und im Sommer möglichst viel Wärme «gratis» abgeführt wird (Abschnitt 4.3.1). Es handelt sich hierbei um einen Kompromiss. Die Punkte b) und c) sind Gegenstand an anderer Stelle im Bericht (Abschnitt 4.4 für b) und Abschnitt 4.5 für c).

⁴⁰ Je nach geografischer Lage des Rechenzentrums herrschen nur schwer vergleichbare Randbedingungen.

⁴¹ In der Realität sind die Verbräuche der eigentlichen Bahntechnikinfrastruktur nicht präzise von den Nebenverbrauchern abgrenzbar. Verwendet wurden 26.5 W/m² interne Abwärmelast, was über das Jahr einem Stromverbrauch von 28'367 kWh entspricht. Dieser Wert deckt sich mit dem gemessenen Stromverbrauch ab USV der SA von 28'975 kWh im Jahr 2018. Der Stromverbrauch ab USV der SA ist die beste Näherung für die innerhalb der Gebäudehülle des BTG anfallenden Abwärmelasten (vgl. Abschnitt 4.2.1).

⁴² $(28'400 \text{ kWh/a} + 3'600 \text{ kWh/a}) / 28'400 \text{ kWh/a} = 1.13$

4.3.1 Materialisierung und Wärmedämmung

In dieser Analyse wurden drei typische Bauweisen gegenübergestellt: Der bereits bekannte Betonbau⁴³, ein Holzmassivbau⁴⁴ und ein Holzleichtbau⁴⁵. Alle Varianten sind in ähnlicher Form in der Praxis bereits etabliert, der Holzbau z.B. beim BTG «Stuls» der RhB (vgl. Abschnitt 4.4.1) oder beim modularen BTG der nächsten Generation der SBB (Prototyp im Bau), der Betonbau bei den Pre-moco-BTG wie «Netstal» (vgl. Abschnitt 3.4).

Die Variantenanalyse zeigt, dass es beim Beton- und Holzleichtbau zur Sicherstellung des Frostschutzes im Winter rund 5 cm Wärmedämmung braucht. Der ungedämmte Betonbau weist im Klima von Zürich über 300 h/a eine Raumlufttemperatur unter 4 °C auf, was nicht akzeptabel ist (Abbildung 28). Beim Massivholzbau braucht es keine zusätzliche Dämmung an der Fassade, die wärmedämmenden Eigenschaften einer massiven Holzbauweise reichen völlig aus (Minimaltemperatur 13.2 °C).

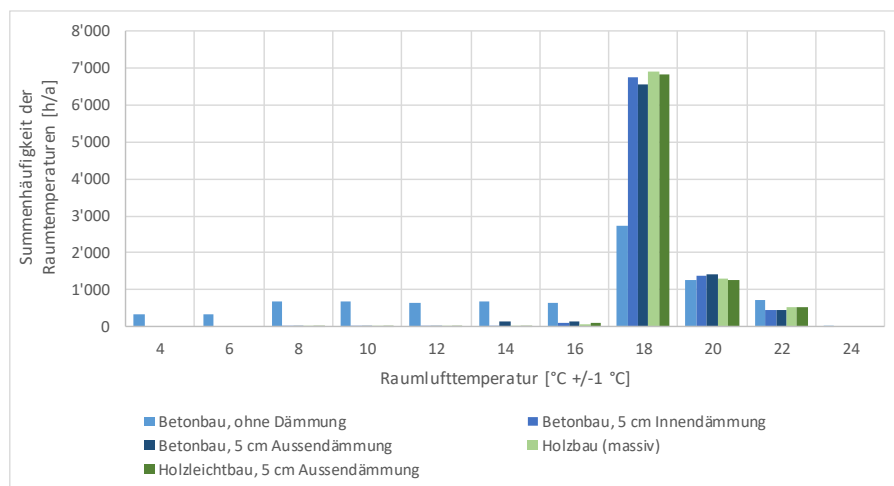


Abbildung 28: Summenhäufigkeit der Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Bauweise und Wärmedämmung (Betonbau vs. Holzbau).

Ob die Dämmung innen oder aussen angebracht wird, hat kaum Einfluss auf die Raumlufttemperaturverteilung (Abbildung 28). Dies mag erstaunen, könnte man doch eine relevante Wirkung der thermischen Speichermasse der Innenseite des Raums vermuten, welche durch die Dämmung quasi abgekoppelt wird.

⁴³ Betonbau, 20 cm Betonelemente an der Aussenwand, 1.5 cm Gipsfaserplatte innen, Dach 22 cm Beton mit 1.5 cm Gipsfaserplatte innen, Bodenplatte 20 cm Beton mit Luftraum und Betonsockel. Klima Zürich, 26.5 W/m² interne Abwärme, 9.5-facher Luftwechsel, 22 °C Raumsolltemperatur, bestehende Regelung: Free Cooling ab 18.5 °C Raumtemperatur, mech. Kühlung ab 21.5 °C, Zulufttemperatur bei mech. Kühlung 12 °C, EER der Kältemaschine 3.

⁴⁴ Holzbau, 18 cm Massivholz an der Aussenwand, 1.5 cm Gipsfaserplatte innen, Dach 18 cm Massivholz mit durchschn. 4 cm Gefälledämmung aussen und 1.5 cm Gipsfaserplatte innen, Bodenplatte 18 cm Massivholz mit Luftraum und Betonsockel. Klima Zürich, 26.5 W/m² interne Abwärme, 9.5-facher Luftwechsel, 22 °C Raumsolltemperatur, bestehende Regelung: Free Cooling ab 18.5 °C Raumtemperatur, mech. Kühlung ab 21.5 °C, Zulufttemperatur bei mech. Kühlung 12 °C, EER der Kältemaschine 3.

⁴⁵ Analog zu Massivholzbau, aber nur 3 cm Massivholz bei Boden, Dach und Fassade.

■

Stahlbeton verfügt über die 17-fache thermische Speicherkapazität pro Volumen wie das eingesetzte Holz.⁴⁶

Dieses Verhalten wird erst durch eine detaillierte Analyse nachvollziehbar. Die internen Lasten im BTG folgen keinem deutlichen Tagesprofil, sondern sie fallen sehr konstant an (vgl. Abbildung 25 auf Seite 53). Es gibt an der Innenseite somit keinen Bedarf, die interne Abwärme «zwischenzuspeichern». Sie soll möglichst unmittelbar über die Gebäudehülle nach aussen abfliessen. Dies findet statt, solange über die Gebäudehülle von innen nach aussen ein Temperaturgefälle besteht. Solare oder konvektive Lasten auf die Aussenseite der Gebäudehülle, welche bei entsprechender Witterung als tägliche Wellen anfallen, stören allerdings diesen erwünschten Wärmefluss.

Am Modell des Betonbaus mit 5 cm Innendämmung (Abbildung 30) und 5 cm Aussendämmung (Abbildung 31), dem massiven Holzbau (Abbildung 32) und dem gedämmten Holzlichtbau (Abbildung 33) zeigt sich am Klima von Zürich, dass der Wärmefluss im Winter (Kalenderwoche 2, linker Teil der Abbildungen) kontinuierlich von innen nach aussen stattfindet, selbst wenn in der betrachteten Periode täglich Solarstrahlung auf die Gebäudehülle traf. Dies entspricht der erwünschten «Gratis-Kühlung». Die Netto-Wärmebilanz der Gebäudehülle beim Betonbau (innen oder aussengedämmt) beträgt rund -464 kWh (-22.7 W/m²) gegenüber -370 kWh (-18.1 W/m²) beim Massivholzbau resp. -414 kWh (20.2 W/m²) beim Holzleichtbau. Im Winter wird somit bei allen Bauweisen ein Grossteil der 26.5 W/m² an interner Last ohne aktive Lüftung oder Kühlung über die Gebäudehülle abgeführt.

In der Übergangsjahreszeit (Kalenderwoche 16, mittlere Abbildungen) gibt es bei allen Bauweisen immer noch sehr wenig Gewinne über die Hülle. Die «Wärmewellen» von aussen erreichen die Innenseite Wand noch kaum, weil während den kalten Nächten wieder Wärme abfliesst. Die «Gratiskühlung» wirkt weiterhin fast lückenlos. Beim Betonbau betragen die Verluste -134 kWh (innen gedämmt) resp. -168 kWh (aussen gedämmt), beim massiven Holzbau -103 kWh, beim Holzleichtbau -124 kWh. Die Lüftungsverluste sind in allen Fällen bereits deutlich höher als die Verluste über die Hülle.

Erst im Sommer (Kalenderwoche 30, rechte Abbildungen) wird die Hülle zeitweise, aber bei allen Bauweisen, zur unerwünschten Gewinnfläche. Die Wärmegewinne durch solare Gewinne über die Aussenseite der Hülle treffen verzögert im Innenraum ein, was die Kühlung tagsüber (bei hoher Aussentemperatur) entlastet und den Free Cooling-Anteil (nachts) steigert. Das Verhalten der Stahlbetonbauweise mit hoher Speicherkapazität ist zwar träger, aber die Nettobilanz der Wärmegewinne der Massivbauweisen unterscheidet sich nicht so stark von der Leichtbauweise. Beim innen gedämmten Betonbau liegt die Bilanz bei +59 kWh (Gewinn +70 kWh, Verlust -11 kWh), beim aussen gedämmten Betonbau bei +34 kWh. Der Massivholzbau ordnet sich bei +45 kWh (Gewinn +63 kWh, Verlust -18 kWh) und der Holzleichtbau bei +51 kWh ein. Die Netto-Wärmegewinne in sehr warmen Wochen sind demnach bei den Bauweisen mit viel thermischer Masse nur besser, wenn die Dämmung aussen angebracht wird, und auch dann nur unwesentlich.

⁴⁶ Stahlbeton verfügt bei 1001 J/(kg*K) und 2300 kg/m³ über 2302 kJ/(m³*K) thermische Speicherkapazität, das eingesetzte Holz bei 828 J/(kg*K) und 160 kg/m³ nur über 132 kJ/(m³*K).

Insgesamt ist die **Bauweise für den Strombedarf der Lüftung und die Klimakälte nicht entscheidend**: Alle Bauweisen liegen innerhalb von weniger als 2.4 % Abweichung (Abbildung 29).

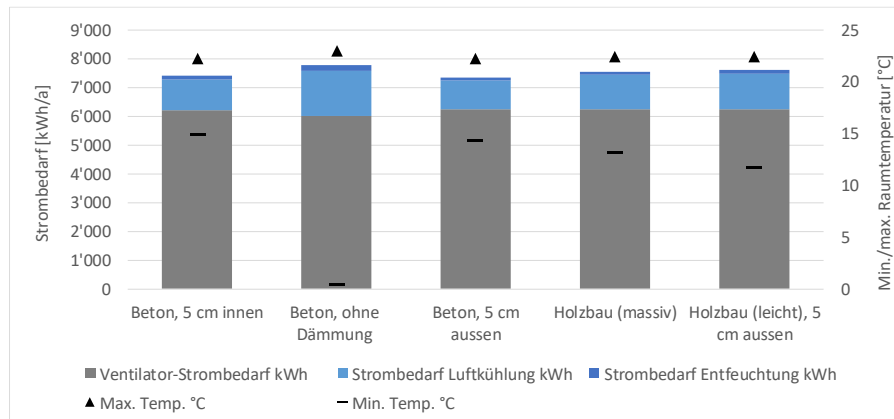


Abbildung 29: Strombedarf für die Lüftung und Kühlung in Abhängigkeit der Bauweise.

Es gilt die **Faustregel für die Wärmedämmung beim BTG: «So wenig wie möglich, so viel wie nötig (Frostschutz)»**. Dieser Grundsatz gilt für alle Bauweisen. Der Holzbau schneidet betreffend Kühlbedarf im Sommer leicht besser ab, der Betonbau in der Übergangsjahreszeit und im Winter. Über das gesamte Jahr brauchen alle zulässigen Bauweise (dh. ausser Betonbau ohne Dämmung) fast gleichviel Strom für Lüftung und Kühlung⁴⁷. **Eine hohe thermische Speichermasse ist damit kein primäres Ziel beim BTG.**

⁴⁷ Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 9.5-facher Luftwechsel, 26.5 W/m² interne Abwärmelast, herkömmliche Regelung. Bei Anwendung der verbesserten, bedarfsbasierten Lüftungsregelung (vgl. Abschnitt 4.5.1) zeigt sich das gleiche Verhalten bei insgesamt tieferem Strombedarf für Lüftung und Kühlung.

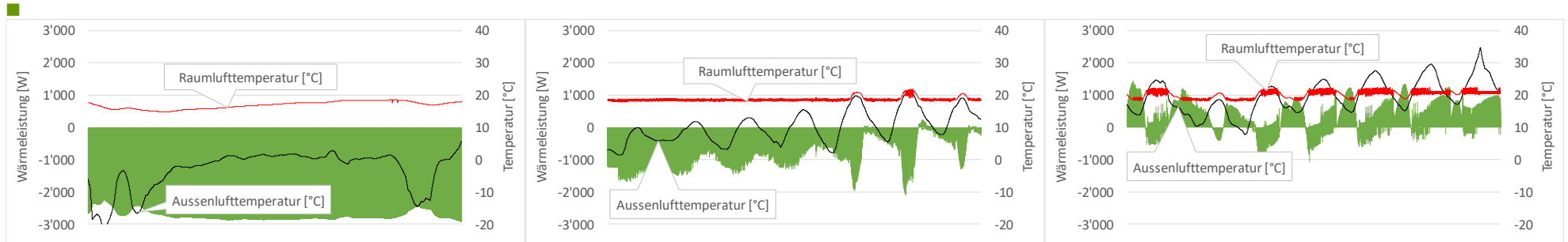


Abbildung 30: Wärmefluss durch die Gebäudehülle beim mit **5 cm innen gedämmten Betonbau** (grüne Fläche) während einer Winterwoche (links), einer Woche der Übergangsjahreszeit (Mitte) und einer Sommerwoche (rechts). Negative Werte sind Wärmeübergänge von der Raumlufte auf die Wand. Zum Vergleich: Aussenlufttemperatur (schwarz) und Raumlufteemperatur (rot).

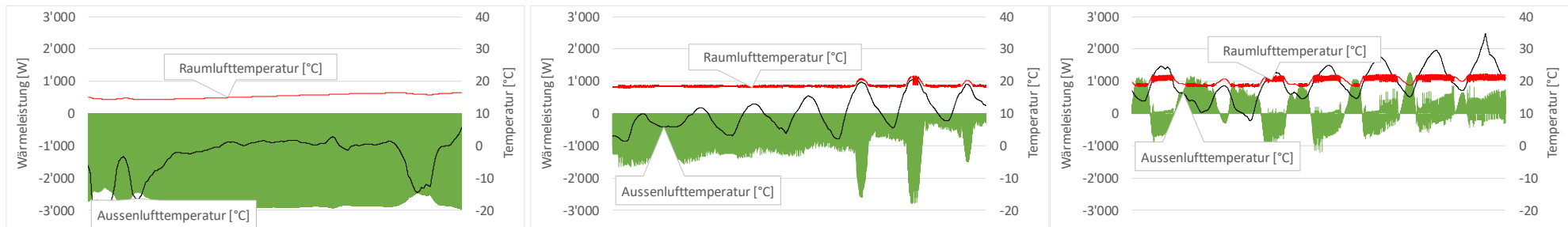


Abbildung 31: Wärmefluss durch die Gebäudehülle beim mit **5 cm aussen gedämmten Betonbau** (grüne Fläche) während einer Winterwoche (links), einer Woche der Übergangsjahreszeit (Mitte) und einer Sommerwoche (rechts). Negative Werte sind Wärmeübergänge von der Raumlufte auf die Wand. Zum Vergleich: Aussenlufttemperatur (schwarz) und Raumlufteemperatur (rot).

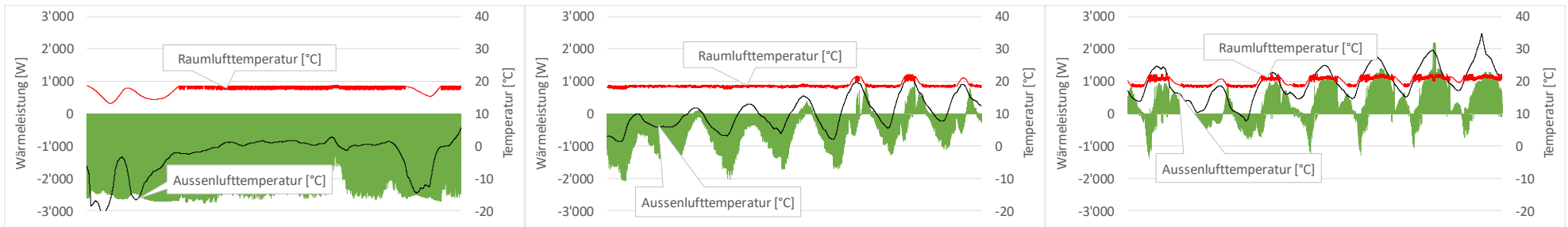


Abbildung 32: Wärmefluss durch die Gebäudehülle beim **massiven Holzbau** (grüne Fläche) während einer Winterwoche (links), einer Woche der Übergangsjahreszeit (Mitte) und einer Sommerwoche (rechts). Negative Werte sind Wärmeübergänge von der Raumlufte auf die Wand. Zum Vergleich: Aussenlufttemperatur (schwarz) und Raumlufteemperatur (rot).

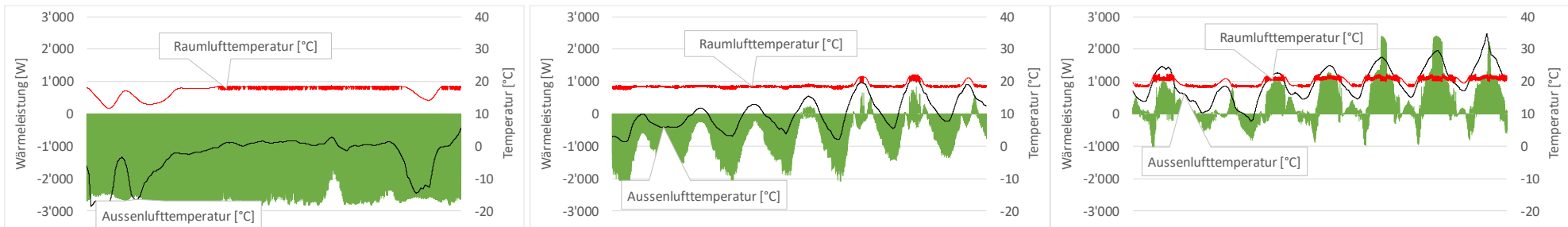


Abbildung 33: Wärmefluss durch die Gebäudehülle beim mit 5 cm gedämmten **Holzleichtbau** (grüne Fläche) während einer Winterwoche (links), einer Woche der Übergangsjahreszeit (Mitte) und einer Sommerwoche (rechts). Negative Werte sind Wärmeübergänge von der Raumlufte auf die Wand. Zum Vergleich: Aussenlufttemperatur (schwarz) und Raumlufteemperatur (rot).

4.3.2 Effekte des Standortklimas

Der Standort eines BTG hat erwartungsgemäss einen grossen Einfluss auf den Strombedarf für Kühlung und Lüftung. Bei höherer Aussenlufttemperatur muss für das Free Cooling für die gleiche Kälteleistung mehr Luft umgewälzt werden und die mechanische Kühlung ist häufiger im Einsatz. Dieser Sachverhalt zeigt sich deutlich am Modell⁴⁸ mit unterschiedlichen Klimadaten von Zürich (stellvertretend für das Mittelland), Lugano (stellvertretend für die Alpensüdseite) und Davos (stellvertretend für den alpinen Raum). Der Stromverbrauch für Lüftung und Kühlung in Davos liegt 42 % unter demjenigen von Zürich, Lugano 53 % darüber (Abbildung 34)⁴⁹.

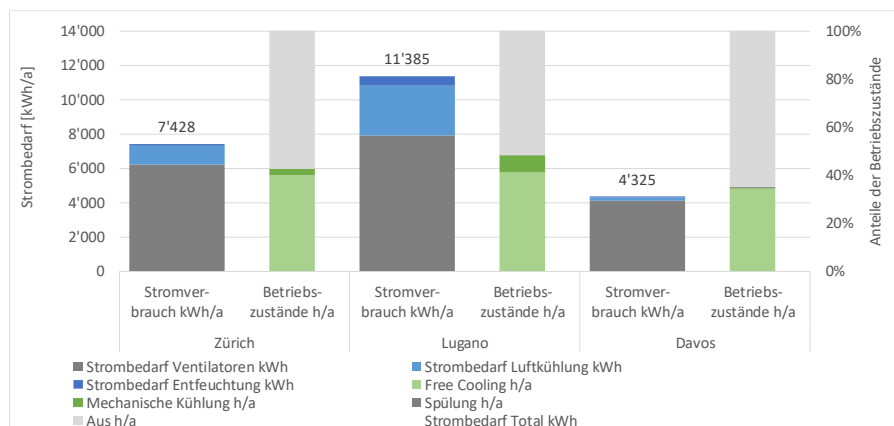


Abbildung 34: Vergleich des Stromverbrauchs für Lüftung und Kühlung sowie der Betriebszustände der Lüftungsanlage beim Betonbau an verschiedenen Standorten.

Nun könnte die Gebäudehülle an den Standort des BTG angepasst werden, indem die Dämmung je nach Klima vergrössert oder minimiert wird, sodass die Frostsicherheit eingehalten wird und gleichzeitig möglichst viel Wärme über die Hülle abfliessen kann (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Eine Verstärkung der Dämmung über 5 cm ist beim Betonbau in Davos jedoch nicht nötig, weil mit dem sich dadurch ergebenden, statischen U-Wert von ca. $0.51 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bereits Frostsicherheit erreicht wird. Die Minimaltemperatur bei 5 cm Dämmung liegt bei 10.4°C und mehr Dämmung bringt energetisch keinen relevanten Nutzen (Abbildung 35). Ganz ohne Dämmung würden (bei den simulierten $26.5 \text{ W}/\text{m}^2$ an internen Lasten) hingegen Minustemperaturen im Innenraum resultieren. **Das bedeutet, dass auch im alpinen Klima der Betonbau mit 5 cm Dämmung (innen oder aussen) oder ein äquivalenter Holzbau bezüglich Frostschutz und Energiebedarf optimal sind.**

⁴⁸ Betonbau mit 5 cm Innendämmung, 9.5-facher Luftwechsel, $26.5 \text{ W}/\text{m}^2$ interne Last, bestehende Regelung, 22°C Raumsolltemperatur. EER der Kältemaschine 3. Free Cooling ab 18.5°C Raumtemperatur, mech. Kühlung ab 21.5°C Raumtemperatur (Zulufttemperatur 12°C).

⁴⁹ Alle Standorte weisen eine minimale Lufttemperatur im BTG von mindestens 10°C auf, die Maxima sind identisch.

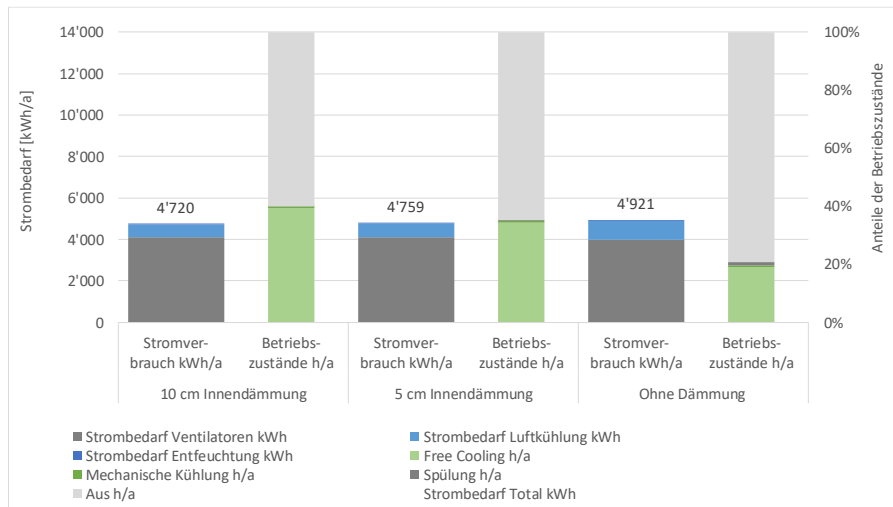


Abbildung 35: Vergleich des Stromverbrauchs für Lüftung und Kühlung sowie der Betriebszustände der Lüftungsanlage für verschiedene Wärmedämmvarianten beim Betonbau am Standort Davos. Die Variante ohne Dämmung führt zu inakzeptabel tiefen Raumtemperaturen.

Auch im Klima von Lugano ergibt sich ein ähnliches Bild: Mit 5 cm innen oder aussen angebrachter Dämmung ergibt sich beim Betonbau bereits ein tiefer Energiebedarf (Abbildung 36) bei gleichzeitiger Einhaltung des Frostschutzes. 10 cm Dämmung bringt leichte Energieeinsparungen, welche aber die Mehrkosten kaum rechtfertigen. Die Minimaltemperatur einer ungedämmten Variante in Lugano liegt bei 5.1 °C, was bereits kritisch ist und nach einer leichten Dämmwirkung der Gebäudehülle verlangt.

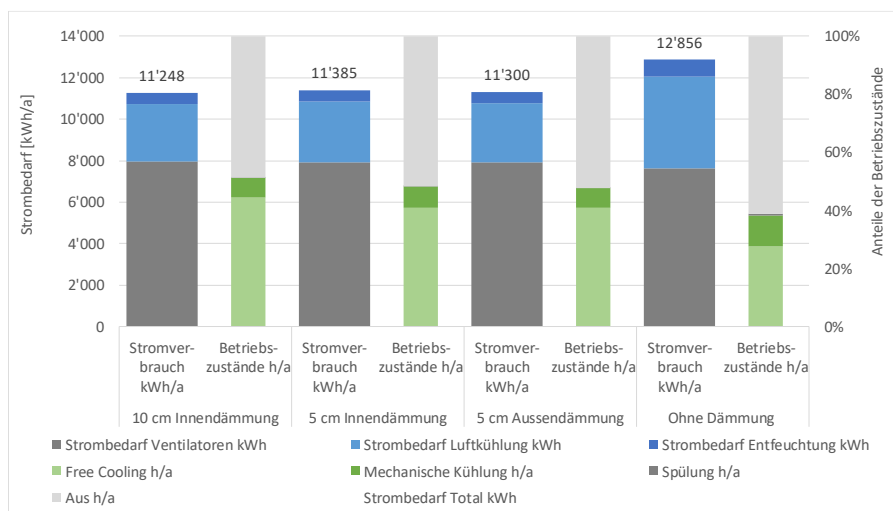


Abbildung 36: Vergleich des Stromverbrauchs für Lüftung und Kühlung sowie der Betriebszustände der Lüftungsanlage für verschiedene Wärmedämmvarianten beim Betonbau am Standort Lugano.

Im warmen Klima von Lugano hält die Dämmung auch von aussen eindringende Wärme ab, wie die Analyse der Wärmeübergänge von der Raumluft auf die Gebäudehülle in der heissen Kalenderwoche 30 zeigt (Abbildung 37). Über das

ganze Jahr betrachtet überwiegen die unerwünschten Wärmeeinträge über eine ungedämmte Gebäudehülle die Wärmeverluste zwar nicht, aber die konzentrierten Gewinne im Sommer fallen in einer Zeit an, in der die Kühlung des BTG durch den Kältemaschinenbetrieb relativ energieaufwändig ist. **Somit lohnt sich auch im warmen Klima der Alpensüdseite eine Dämmung von 5 cm am Betonbau resp. ein äquivalenter Holzbau.**

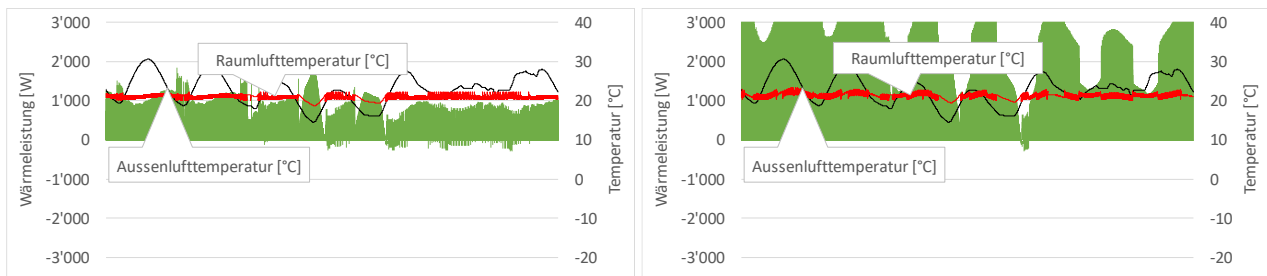


Abbildung 37: Wärmefluss durch die Gebäudehülle beim Betonbau (grüne Fläche) während einer Sommerwoche am Standort Lugano mit 5 cm Innendämmung (linke Grafik) und ohne Dämmung (rechte Grafik). Negative Werte sind Wärmeflüsse von der Raumluft auf die Wand. Zum Vergleich: Aussenlufttemperatur (schwarz) und Raumlufttemperatur (rot).

Als Faustregel zeigt sich, dass bei der Dimensionierung der Dämmung grundsätzlich nicht nach dem Standort differenziert werden muss. Eine komplett ungedämmte Bauweise ist bauphysikalisch und energetisch nicht optimal. Ein Massivholzbau oder eine mit ca. 5 cm innen oder aussen gedämmte Beton- oder Holzleichtbauweise mit einem U-Wert von rund 0.5 W/m^2 sind an allen Standorten ein guter Kompromiss.

4.4 Prinzipien der Kühlung im Technikraum

4.4.1 Lüftungskonzepte für den Technikraum

Die Analyse verschiedener Standorte der beteiligten Bahnen hat unterschiedliche Ansätze zur Kühlung der Technikräume gezeigt. Auf der einen Seite steht der Ansatz eines minimal technisierten BTG der RhB in Stuls an der Albulalinie auf 1265 m.ü.M. (Abbildung 38), welches ganzjährig passiv gekühlt wird. Das BTG hat einen SA-Raum (41 m²) sowie einen NT-Raum (20 m²) mit je einem mechanischen Zuluftventilator und einfacher Luftverteilung sowie einer passiven Abluftklappe an der gegenüberliegenden Fassade. Die Regelung der Ventilatoren erfolgt mittels einem einfachen An-Aus-Schalter bei 24 °C resp. 23 °C Raumlufttemperatur.



Abbildung 38: BTG «Stuls» an der Albulalinie. Quelle: RhB

Die gemessene, mittlere elektrische Last des BTG «Stuls» liegt bei 1.8 kW, was bei 61 m² Nettogeschossfläche 29.5 W/m² entspricht und nicht stark von der internen Last des BTG «Netstal» (26.5 W/m², vgl. Tabelle 5 auf Seite 54) abweicht. Die Summenhäufigkeit der Lastzustände im BTG «Stuls» zeigt, dass sich der Leistungsbedarf praktisch ganzjährig (98% der Zeit) in einem engen Bereich zwischen 1.2 kW und 2.4 kW bewegt (Abbildung 39).

Dank der alpinen Bedingungen am Standort mit Aussenlufttemperaturen unter 24 °C auch im Hochsommer, kann so die Raumtemperatur in der Regel auf unter 28 °C gehalten werden. Eine Raumsolltemperatur von 22 °C (vgl. Abschnitt 4.1.1) wäre mit diesem Konzept allerdings nicht durchgängig einzuhalten, selbst im alpinen Raum nicht. Dieser Ansatz eignet sich demnach für alpine BTG-Standorte mit geringen Temperaturanforderungen (28 °C) und ist unter diesen Bedingungen sehr effizient.

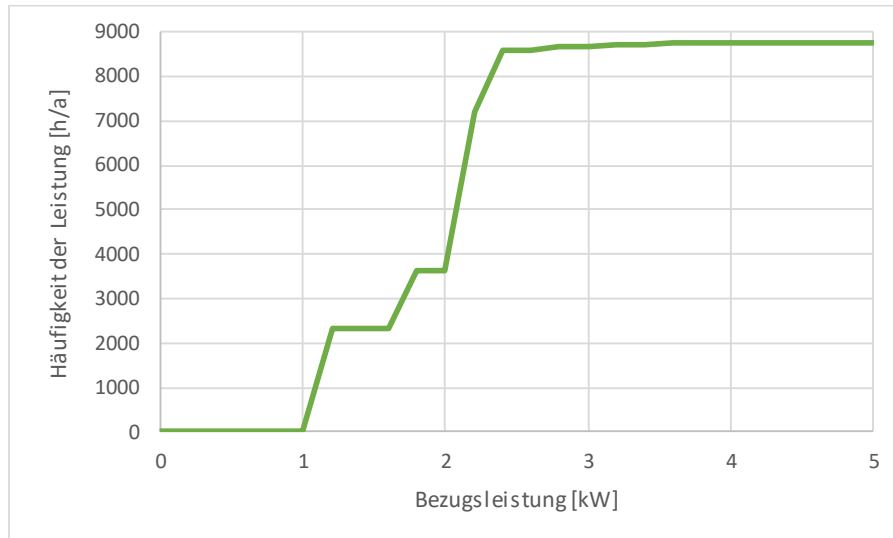


Abbildung 39: Summenhäufigkeit der elektrischen Last im BTG "Stuls", gemessen vom 1. Juni 2018 bis am 20. März 2019 und auf das ganze Jahr extrapoliert. Quelle: RhB

Bei tieferen Raumsolltemperaturen, hohen internen Lasten und Standorten im nicht-alpinen Raum muss mechanische Kälte installiert werden, um die Anforderungen einhalten zu können. Zum Einsatz kommen unter anderem

- Monoblock-Lüftungssysteme mit Direktverdampfer-Kältemaschine
- Umluftklimageräte

Beide Anlagentypen können Free Cooling unterstützen: Entweder, indem bei der Monoblockanlage direkt Aussenluft in den Raum gefördert wird (direkte freie Kühlung, sehr effizient), oder indem beim Umluftkühlgerät ein (separater) Fluidkreislauf ohne Kompressor betrieben wird (indirekte freie Kühlung)⁵⁰.

Direktes Free-Cooling mit Aussenluft kann bei 22 °C Raumsolltemperatur unterhalb von ca. 18 °C Aussenlufttemperatur eine Teilleistung erbringen, was im Klima vom Schweizer Mittelland während rund 86 % des Jahres zutrifft (7'500 h/a in der Abbildung 40). Beim Umluftkühlgerät ergeben sich gegenüber der Monoblock-Lösung zwei zusätzliche Wärmeübergänge an den Wärmetauschern. Dadurch kann der Free Cooling-Betrieb erst bei einer Aussenlufttemperatur ab ca. 5 °C unterhalb der Raumsolltemperatur einsetzen. Wird bei 22 °C Raumsolltemperatur mit einer Zulufttemperatur von 18 °C gearbeitet, dann kann indirektes Free Cooling im Idealfall unterhalb von ca. 13 °C Aussenlufttemperatur genutzt werden. Dies trifft im Klima von Zürich während rund 67 % des Jahres zu (5'883 h/a in der Abbildung 40). Häufig arbeitet ein Klimagerät allerdings mit einer fixen Kaltwassertemperatur von z.B. 7 °C, wodurch der Free Cooling-Betrieb erst unterhalb von 2 °C zum Einsatz kommt (22 % des Jahres oder 1'903 h/a).

Ein Umluftkühlgerät mit indirektem Free-Cooling ist technisch relativ aufwändig und wir haben unter den analysierten Standorten keine solche Anlage angetroffen.

⁵⁰ Es gibt noch weitere Varianten, welche hier aufgrund ihrer Eignung für Technikräume mit hochsensibler Elektronik nicht erwähnt werden.

fen. **Auch aus energetischer Sicht ist die Lösung mit einem Monoblock und direkter Aussenluftkühlung gegenüber einer Umluftkühlung mit indirektem Free Cooling zu bevorzugen, weil der Anteil freier Kühlung beim ersten System höher ist.** Dies gilt, da im BTG keine speziell hohen Anforderungen an die Luftfeuchtigkeit oder die Sauberkeit der Luft gelten und vielfach sogar ein gewisser Aussenluftwechsel erforderlich ist zur Abführung von Batterieausgasungen (vgl. Abschnitt 4.1).

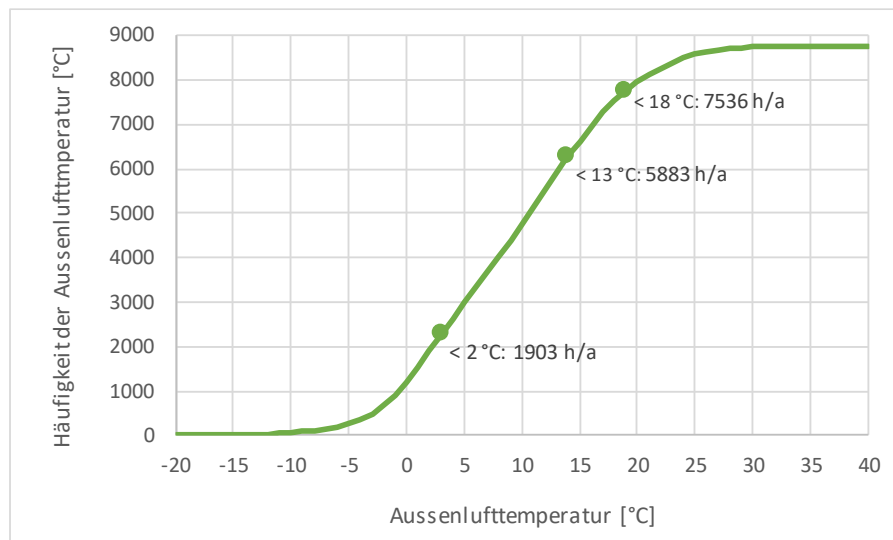


Abbildung 40: Maximal mögliche, jährliche Stunden im Free Cooling Betrieb im Schweizer Mittelland (Klimadaten Zürich Kloten) bei unterschiedlichen Grenztemperaturen der Aussenluft.

Ein Monoblocksystem mit direkter Kühlung mit Aussenluft sollte zwingend mit Umluftschaltung ausgerüstet sein, damit im Sommer bei einer Aussenlufttemperatur über der Raumtemperatur auf Umluftbetrieb gewechselt werden kann. In diesem Fall funktioniert das System analog zu einem Umluftklimagerät. Durch eine variable Umluftbeimischung kann zudem im Winter eine minimale Raumlufttemperatur eingehalten werden.

4.4.2 Stromverbrauch der Luftförderung

Der Einfluss der Luftförderung auf die Effizienz der Konditionierung im BTG ist sehr gross. Der Strombedarf der Luftförderung steigt in dritter Potenz zur bewegten Luftmenge. Somit verbraucht ein gleichmässig zwischen 0 % und 100 % taktender Ventilator in der Summe doppelt so viel Strom als einer, der konstant auf 50 % läuft, obwohl am Ende gleich viel Luft bewegt wurde (Abbildung 41).

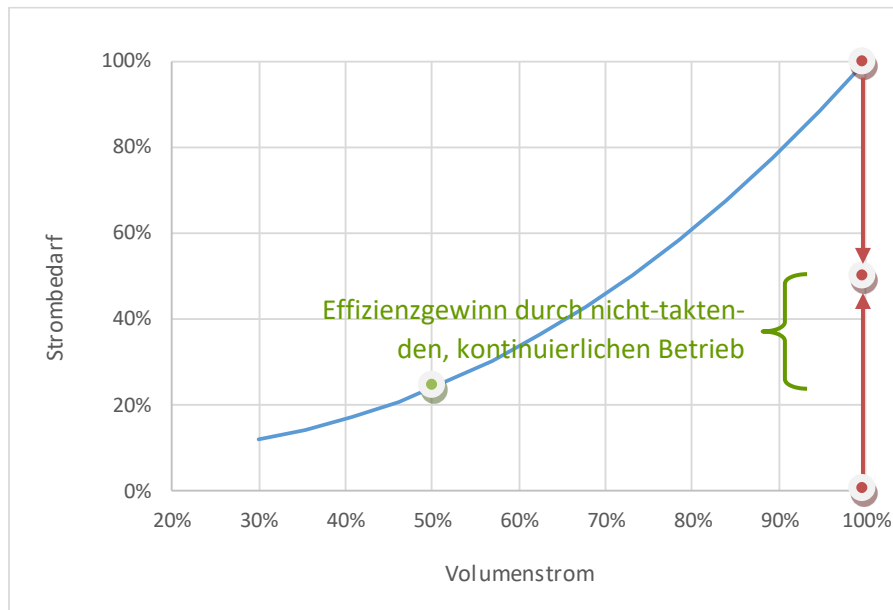


Abbildung 41: Überproportionaler Anstieg des Strombedarfs eines Lüftungsantriebs (Ventilatoren) im Verhältnis zum umgewälzten Luftvolumenstrom. Roter Punkt: Strombedarf bei durchschnittlich 50 % Luftmenge mit den Betriebspunkten 0 % und 100 %. Grüner Punkt: Betriebspunkt bei konstant 50 % Luftmenge.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass es in Bezug auf die HLK-Systeme im BTG eine relevante Rolle spielt, wie die Luftmenge der Lüftungs- und Kälteanlage geregelt wird und ob die Luft bedarfsgerecht umgewälzt wird.

Ein guter Indikator für eine zu gross dimensionierte Lüftung im BTG ist ein taktender Betrieb selbst im Lastfall. Ist die Lüftungsanlage im Verhältnis zum Kältebedarf des BTG viel zu gross dimensioniert, wird sie selbst beim maximal auftretenden Lastfall noch takten, weil dieser Lastfall unter der Regelgrenze moderner FU-geregelter Lüftungsantriebe von rund 30% liegt. Dies kann daran liegen, dass bei der Auslegung die internen Abwärmelasten (Abschnitt 4.2.1) nicht genügend gut bekannt sind und/oder allfällige Flächenreserven eingerechnet werden (Abschnitt 4.2.2). **Es gilt, bei der Dimensionierung der Anlagen realitätsnahe Daten zu den internen Lasten zu berücksichtigen und die Anlagen knapp auszulegen.**

Der Effekt der maximalen Luftmenge im BTG auf den Strombedarf der HLK-Systeme ist mit der bestehenden Regelung besonders gross, weil die Luftmenge nicht in Abhängigkeit des effektiven Kältebedarfs, sondern nach einer fixen Zuordnung an die Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur geregelt wird (vgl. dazu Abschnitt 4.5.1). Diese Zuordnung wird auf der Basis einer konservativen Auslegung des Kältebedarfs gemacht und hat zur Folge, dass im Normalbetrieb zu viel Luft bewegt wird.

Der maximal notwendige Luftwechsel ergibt sich bei einer gegebenen (realistischen) Abwärmelast und einer gegebenen Temperaturdifferenz dT zwischen Raumsoll- und Zulufttemperatur näherungsweise aus der spezifischen Wärmekapazität der Luft c_p von $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, der Dichte der Luft ρ von ca. $1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$ sowie der Raumhöhe. Hinzu kommen noch die solaren Wärmeeinträge.



$$\text{Luftwechsel [h}^{-1}\text{]} = \frac{(\text{Spez. Abwärmelast } [\frac{\text{W}}{\text{m}^2}] + \text{Solare Last } [\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]) * 3.6 [\frac{\text{kJ}}{\text{Wh}}]}{\text{Raumhöhe [m]} * dT [\text{K}] * c_p [\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}] * \rho [\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]}$$

Formel 3: Berechnung des notwendigen Luftwechsels bei gegebener Wärmelast, Raumhöhe und Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumsolltemperatur.

Die solaren Wärmeeinträge sind im Vergleich zu den internen Abwärmelasten von 545 kWh pro Woche (bei 26.5 W/m²) gering. Bei allen geprüften Bauweisen, welche im Winter nicht zu Frost führen⁵¹, treffen in der heissesten Sommerwoche im Klima von Zürich maximal 59 kWh Netto-Wärmeeinträge über die Fassade im Raum ein (entsprechend 2.8 W/m²), in Lugano sind die solaren Gewinne mit 119 kWh (5.8 W/m²) etwas höher und in Davos sogar negativ.

Bei 26.5 W/m² interner Abwärme, 3 W/m² solarem Eintrag und 10 K Temperaturdifferenz sowie 3.8 m Raumhöhe beträgt der berechnete Minimalluftwechsel 2.5 h⁻¹. Dies ist ein Bruchteil der im exemplarischen BTG installierten 9.5 h⁻¹. Die Modellrechnungen bestätigen dies: Bis zu einem Luftwechsel von ca. 3 h⁻¹ nimmt der Energiebedarf für Lüftung und Kühlung um fast 50 % ab (Abbildung 42), bei 2 h⁻¹ können die Sollwerte nicht mehr eingehalten werden (Abbildung 43). Die geringere Luftmenge schränkt zwar die Wirkung von Free Cooling ein, aber dieser Effekt wird durch den reduzierten Strombedarf für die Ventilatoren mehr als kompensiert.

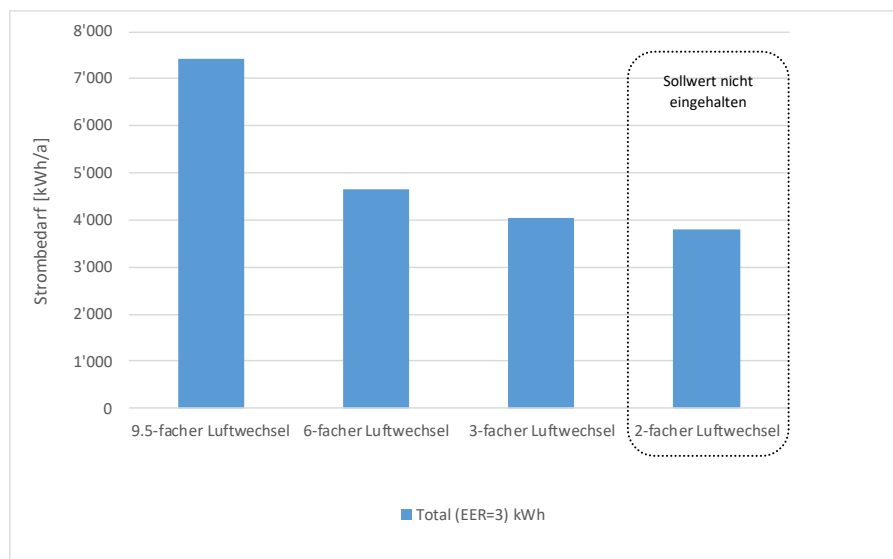


Abbildung 42: Strombedarf der Lüftung und Kühlung bei unterschiedlichen Luftwechselraten bei 26.5 W/m² interner Abwärmelast.

⁵¹ Stahlbeton mit 5 cm Dämmung, Massivholz ohne Dämmung oder Holzleichtbau mit 5 cm Dämmung. Fensterloser Raum, 22 °C Raumsolltemperatur. Die Verluste und Gewinne über die Gebäudehülle in Abhängigkeit der Bauweise sind Gegenstand der Analyse im Abschnitt 4.3.



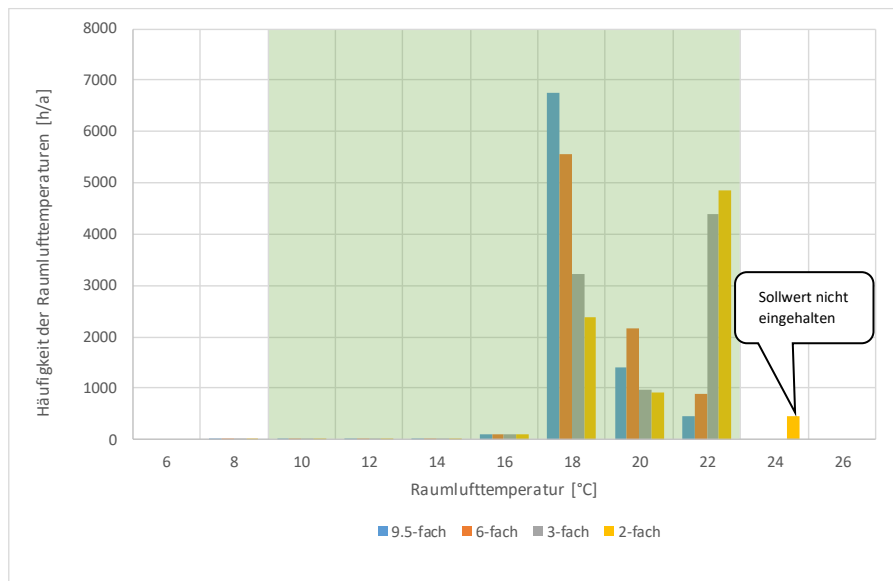


Abbildung 43: Verteilung der Raumtemperaturen im BTG über ein Jahr bei 26.5 W/m^2 interner Abwärmelast und verschiedenen Luftwechselraten. Grün markiert ist der Sollwertbereich von maximal $22 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$.

Falls die spezifischen internen Lasten höher sind, ist eine höhere Luftmenge nötig, um die nötige Kälteleistung im Raum bereitstellen zu können. Auch eine andere Klimazone kann den Zuschlag für solare Lasten erhöhen oder senken.

4.4.3 Zulufttemperatur bei mechanischer Kühlung und Entfeuchtung

Beim analysierten BTG «Netstal» war die Zulufttemperatur im mechanischen Kältemodus auf 12 °C fixiert. Eine Erhöhung der Zulufttemperatur reduziert zwar die unerwünschte Entfeuchtung, führt aber zu erhöhtem Ventilatorstrombedarf, weil aufgrund der höheren Temperatur der Zuluft mehr Luft bewegt werden muss für eine bestimmte Kälteleistung im Raum.

Die Analyse zeigt, dass im Betriebsmodus mit mechanischer Kälte eine **Zulufttemperatur von ca. 7 °C bis 10 °C unter dem Raumsollwert ein guter Kompromiss** aus Energieeffizienz des Kälteprozesses (EER), Ventilatorstrombedarf und nicht nutzbarer Entfeuchtungsenergie ist (Abbildung 44)⁵². Bei 28 °C Raumsolltemperatur liegt die optimale Zulufttemperatur somit höher als bei 22 °C .

⁵² Betonbau mit 5 cm Innendämmung, Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 6-facher Luftwechsel, optimierte Regelung (PID-Regler nach Kältebedarf), inkl. Berücksichtigung des Effekts einer besseren EER der Kältemaschine bei höherer Verdampfungstemperatur.

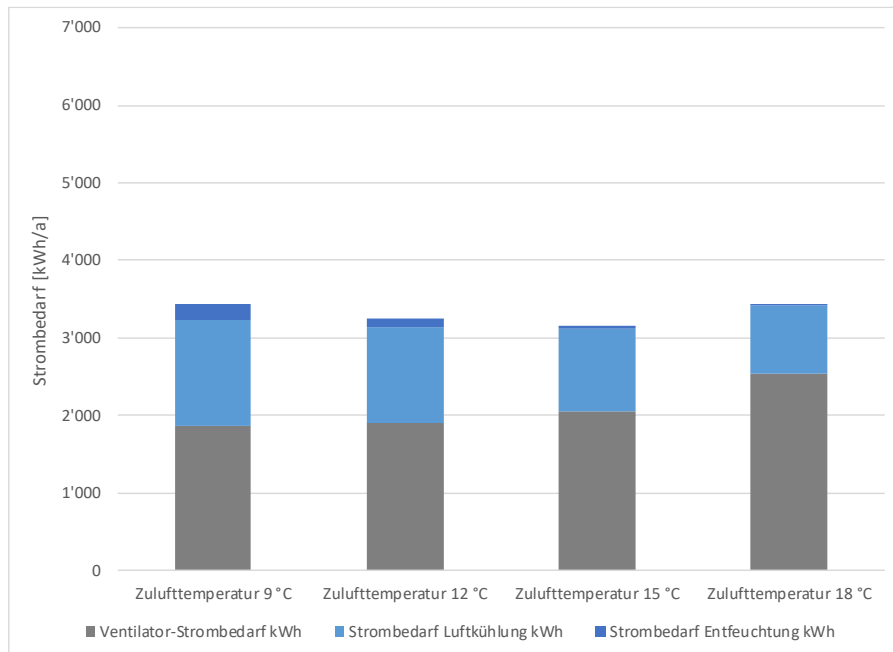


Abbildung 44: Strombedarf für die Luftförderung sowie die Kühlung und Entfeuchtung der Zuluft im BTG bei 22 °C Raumsolltemperatur während einem Jahr bei verschiedenen Zulufttemperaturen. Modell gemäss Fussnote 52.

Die Regelung der Kälteanlage sollte nicht pauschal eine möglichst hohe Verdampfungs- und Zulufttemperatur vorsehen zugunsten eines hohen EER und um unnötige Entfeuchtung der Zuluft zu vermeiden, sondern den überproportional ansteigenden Strombedarf für die Lüftungsantriebe mitberücksichtigen. Die Faustregel ist, die Zulufttemperatur ca. 7-10 °C unter der Raumsolltemperatur einzustellen.

4.4.4 Umschaltpunkt Free Cooling – Mechanische Kühlung

Im Abschnitt 4.4.2 wurde bereits analysiert, wie sich die Erhöhung der Luftmengeförderung auf den Stromverbrauch auswirkt. In diesem Abschnitt wird das Zusammenspiel zwischen freier Kühlung mit Aussenluft (engl. «Free Cooling») und mechanischer Kühlung (mittels Kältemaschine) in Bezug auf die energetische Effizienz untersucht. Ebenfalls bereits ermittelt wurde im Abschnitt 4.4.3, dass bei mechanischer Kühlung die Zuluft mit rund 7 °C bis 10 °C unter der Raumsolltemperatur eingeblasen werden sollte, um ein Optimum an nicht nutzbarer Entfeuchtung, EER der Kältemaschine und Ventilatorstrombedarf zu erreichen. **Nun ist noch zu prüfen, bis zu welchen Bedingungen der Aussenluft- und Raumlufttemperatur die freie Kühlung effizienter ist als die mechanische Kühlung.**

Dies wurde hier geprüft am Beispiel einer realen Regelung für Free Cooling, wie sie beispielsweise auch im exemplarischen BTG «Netstal» zum Einsatz kommt. Der Aussenluftvolumenstrom von maximal 3800 m³/h wird in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenlufttemperatur geregelt (30 % Luftmenge bei 15 K Temperaturdifferenz, 100 % bei 2 K). Entsprechend ergibt sich bei jeder Temperaturdifferenz eine individuelle, freie Kälteleistung. Diese wird einer gleich hohen Kälteleistung mit mechanischer Kälte gegenübergestellt

und die Energieeffizienz (Stromverbrauch durch Lüftungsantriebe und Kompressor) verglichen⁵³. Ab rund 4 K Temperaturdifferenz zwischen der Aussenluft und dem Raumklima ist die freie Kühlung über Aussenluft effizienter als der Einsatz einer mechanischen Kühlung (Abbildung 45).

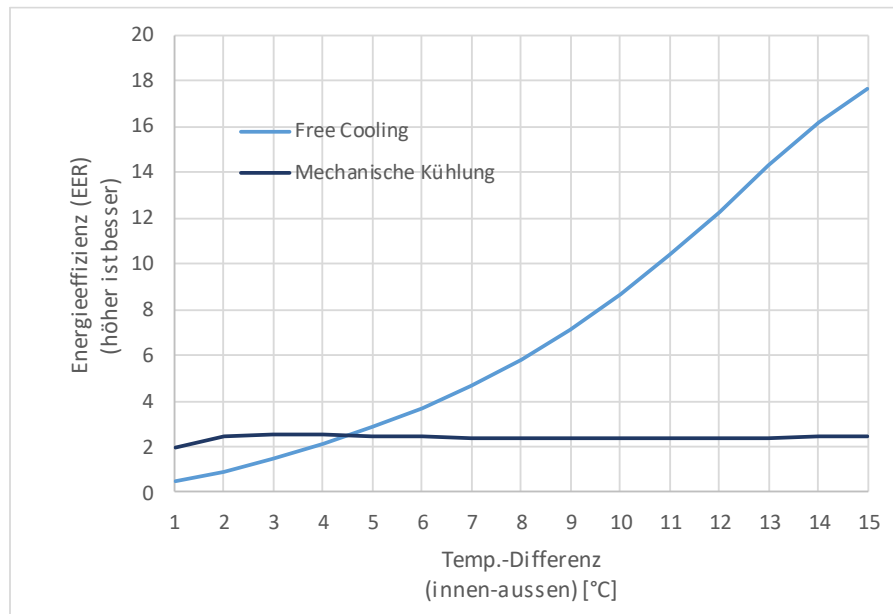


Abbildung 45: Energieeffizienz der Kältebereitstellung mittels freier Kühlung (hellblau) oder mechanischer Kälte (dunkelblau). Höhere Werte sind besser.

Der genaue Übergang hängt aber von weiteren Parametern ab, zum Beispiel von der Effizienz der Kältemaschine, dem Druckverlust der Luftführung und der Effizienz der Ventilatorantriebe, dem Anteil der unerwünschten Entfeuchtung bei mechanischer Kühlung sowie der Auslegung des Lüftungssystems⁵⁴. Zur Absicherung wurde der Sachverhalt am dynamischen Modell des BTG «Netstal» überprüft (Abbildung 46)⁵⁵. Es bestätigte sich, dass der optimale Umschaltzeitpunkt bei 3 bis 4 K liegt, wobei aber die absoluten Einsparungen resp. Mehrverbräuche bescheiden sind. Es besteht ein Tradeoff zwischen Strombedarf der Luftförderung und Strombedarf der mechanischen Kälteerzeugung, welcher sich in etwa die Waage hält.

⁵³ Weitere verwendete Parameter: Ventilatorstrombedarf für Drehzahlregelung mit SFP (Zuluft) 0.405 W/(m³/h) und SFP (Abluft) 0.285 W/(m³/h), Strombedarf in Abhängigkeit der Drehzahl gemäss typischem Profil, Zulufttemperatur bei mech. Kühlung 10 K unter der Raumlufttemperatur, EER der Kältemaschine 3.2.

⁵⁴ Gross dimensionierte Lüftungsanlagen mit wenig Druckverlust sind bei gleicher Luftmengenförderung effizienter als klein dimensionierte Systeme mit hohem Druckverlust.

⁵⁵ Betonbau mit 5 cm Innendämmung, Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 9.5-facher Luftwechsel, optimierte Regelung (PID-Regler nach Kältebedarf), EER der Kältemaschine 3.2.

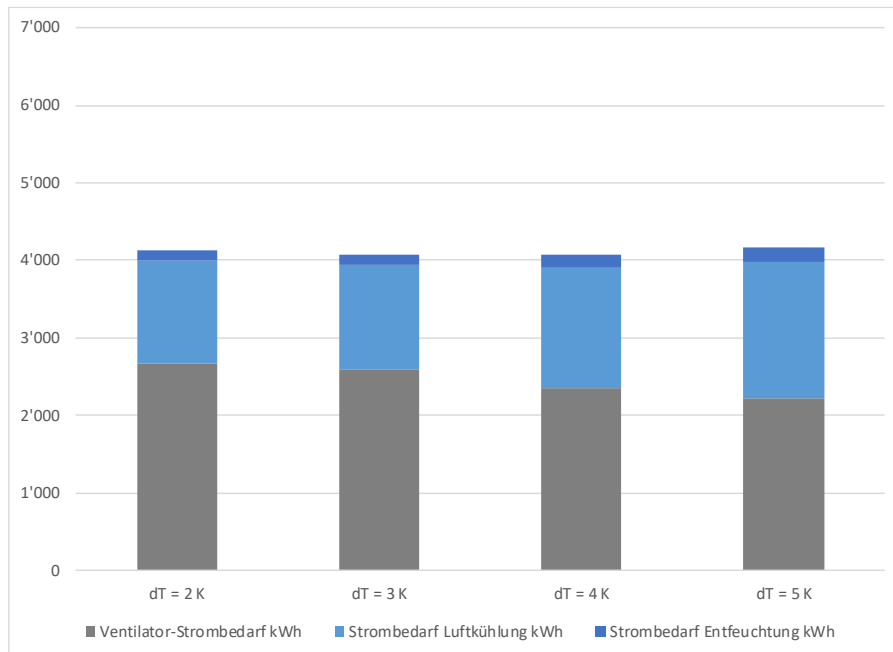


Abbildung 46: Stromverbrauch der Lüftung und Kühlung im BTG bei unterschiedlichen Temperaturunterschieden zwischen Innen- und Aussenlufttemperatur zum Wechsel vom Free Cooling zur mechanischen Kühlung.

4.4.5 Nutzen von Nachtauskühlung

In Bürogebäuden ist Nachtauskühlung mittels Free Cooling in Kombination mit ausreichender thermischer Speichermasse eine effiziente Möglichkeit, den Komfort tagsüber im Sommer zu verbessern. Die Möglichkeit einer Nachtauskühlung besteht auch im BTG, sind doch (zumindest beim Betonbau) sowohl die dazu nötig thermische Speichermasse (bei Innendämmung allerdings stark reduziert) und eine flexibel regelbare Lüftungsanlage vorhanden.

Im BTG erwarten wir allerdings keinen deutlichen Vorteil durch eine Nachtauskühlung. Die Abwärmelast fällt relativ konstant über 24 h an und die solaren Lasten sind im Verhältnis zu den internen Lasten sehr gering. Auch die Verschiebung der Wärmedämmung von innen nach aussen bringt sehr wenig Effizienzgewinn (Abschnitt 4.3.1).

Am Simulationsmodell bestätigt sich dies: Eine «Lüftung auf Vorrat» ist energetisch kontraproduktiv, weil der Mehrbedarf für die Ventilatoren den Nutzen durch die Auskühlung der Speichermasse überwiegt (Abbildung 47). Am Modell⁵⁶ wurde die Regelung so verändert, dass die Lüftung immer dann läuft, wenn die Aussentemperatur mindestens 5 K unter der Raumtemperatur liegt, je nach Variante mit minimaler (30 %) oder voller Luftleistung (100 %). Der Mehrbedarf an Strom für die Kühlung des BTG beträgt selbst bei einer minimalen Nachtauskühlung ab 18.5 °C Raumtemperatur, bei mindestens 5 K Temperaturdifferenz zwischen dem Innen- und dem Aussenklima und einer minimalen

⁵⁶ Betonbau mit 5 cm Innen- resp. Aussendämmung, Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 9.5-facher Luftwechsel, bestehende Regelung (Free Cooling ab 18.5 °C Raumtemperatur, mech. Kühlung ab 21.5 °C).

Luftmenge von 30 % noch 26 %. Eine Aussendämmung verbessert die Situation gegenüber einer Innendämmung nicht (Mehrbedarf 31 %).

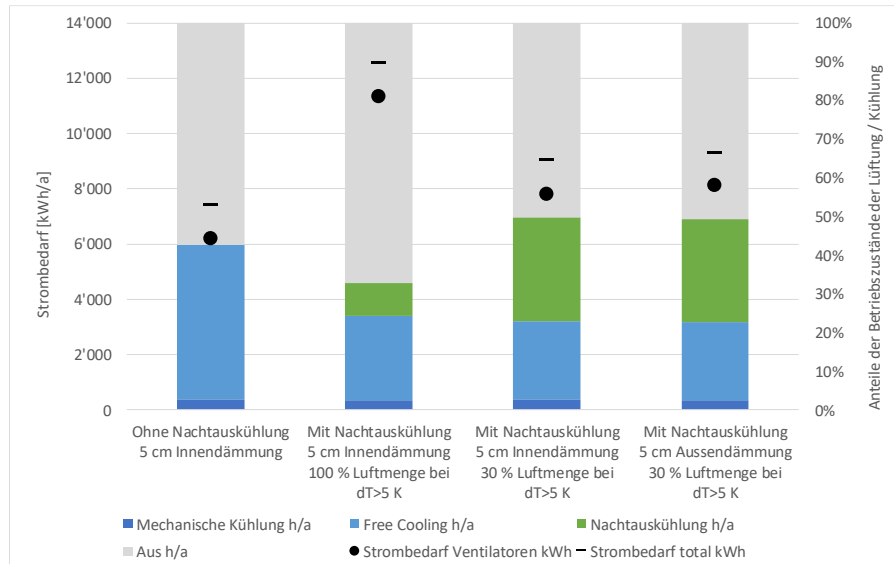


Abbildung 47: Effekte einer forcierten Nachtauskühlung unter verschiedenen Bedingungen (Innen- vs. Aussendämmung, Luftmenge).

Daraus kann geschlossen werden, dass im BTG eine «Lüftung und Kühlung auf Vorrat» (Nachtauskühlung) unter den vorgefundenen Umständen keinen Sinn macht. Es gibt keinen Grund, die thermische Speichermasse auf der Innenseite des BTG aktiv zu bewirtschaften. Das typische BTG unterscheidet sich hier von einem Bürobau.

4.5 Regelung der Lüftungs- und Kälteanlage

4.5.1 Verhalten der bestehenden Regelung

Die bestehende Regelung der Lüftungs- und Kälteanlage im BTG «Netstal» wurde im Rahmen dieser Studie analysiert und es wurden Verbesserungsmassnahmen erarbeitet und deren Wirkung anhand des dynamischen Gebäudemodells geprüft.

Die bestehende Lüftungs- und Kälterege lung sieht vier Betriebsmodi vor:

1. Aus
2. Periodische Spülung
3. Free Cooling mit Aussenluft und ggf. Umluftanteil
4. Mechanische Kühlung (mit maximaler oder ohne Umluft)

Die heutige Regelung ist auf eine Raumsolltemperatur von 28 °C ausgelegt und sieht folgende Regelmechanismen und Standardparameter vor:

- Wechsel in Modus 2 nach 4 h ohne Betrieb in Modus 3 oder 4.
- Einschalt punkt für Modus 3 ab 24.5 °C Raumlufttemperatur (mit Ausschalthysterese). 100 % Luftmenge bei 2 K Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Aussenluft, 30 % Luftmenge bei 15 K Temperaturdifferenz, dazwischen linear interpoliert. Beimischung von Umluft, so dass die minimale Solltemperatur der Zuluft von 8 °C in sichergestellt wird.
- Einschalt punkt für Modus 4 mit mechanischer Kälte ab 28 °C Raumlufttemperatur (mit Ausschalthysterese). Die Kältemaschine ist auf eine Solltemperatur der Zuluft von 15 °C bei 100 % Luftmenge geregelt (mittels Frequenzumformer). Umschaltung auf maximalen Umluftbetrieb (75 % Umluftanteil) wenn die Enthalpie der Aussenluft höher ist als diejenige der Raumluft im Kältemaschinenbetrieb im Modus 4.

Zentrales Merkmal der bestehenden Regelung ist die Tatsache, dass die ventilatorgestützte Luftmenge im Modus 3 (Free Cooling) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Aussenklima geregelt wird. Diese Temperaturdifferenz ist kein guter Sollwertgeber, da die Aussentemperatur bei Räumen mit hohen internen Lasten nur ungenügend mit dem effektiven Kältebedarf korreliert, weil die solaren Lasten nur einen sehr kleinen Teil der Einträge ausmachen (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Weiterhin wird aktuell im Betriebsmodus 4 (mechanische Kälte) auf eine fixe Zulufttemperatur von typischerweise 15 °C bei konstant 100 % Luftmenge geregelt⁵⁷. Die Kältemaschine schaltet zudem bei einer fixen Raumtemperatur (z.B. 26°C) ein, unabhängig davon, ob der dann bestehende Kältebedarf noch mit Free Cooling gedeckt werden könnte.

Auch der minimal zulässige Umluftanteil von 25 % entspricht einem mehr als zweifachen Luftwechsel pro Stunde und ist sehr hoch zur Sicherstellung einer

⁵⁷ Die Regelung erfolgt mittels Heissgas-Bypass oder Frequenzumformer am Verdichter.

minimalen Luftqualität resp. für die Abführung von Batterieausgasungen. Bei warmen Aussentemperaturen wird unnötig viel Aussenluft mechanisch gekühlt.

Die bestehende Regelung «kennt» den effektiven Kältebedarf des Raumes nicht und kann die Luftmenge und den Betriebsmodus nicht optimal gemäss dem effektiven Kältebedarf wählen. In der Praxis zeigt sich, dass häufig unnötig viel Luft umgewälzt wird, insbesondere wenn die internen Lasten des Raumes die Annahmen des Auslegungswerts unterschreiten (vgl. Abschnitt 4.2). Dies führt zu beträchtlichem, unnötigem Energieverbrauch für die Ventilatorantriebe (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Am Beispiel von «Netstal» ergibt sich bei 15 °C Zulufttemperatur, 3'800 m³/h und 28 °C Raumlufttemperatur (Einschaltpunkt Modus 4) eine Kälteleistung von 15.8 kW. Dies ist deutlich mehr als die realen, internen Abwärmelasten von ca. 2.8 kW und führt zwangsläufig zu sehr ausgeprägtem Takten und hohem Strombedarf für die Luftförderung (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Dieses Verhalten wird beim BTG «Netstal» sowohl in der Praxis (Abbildung 48) als auch im modellierten Zustand (Abbildung 49) beobachtet⁵⁸: Es findet ein sehr häufiger Wechsel zwischen Auszustand und Betrieb mit Kältemaschine statt. Entsprechend schwankt die Raumtemperatur zwischen der Ein- und der Ausschaltempore für die Kältemaschine.

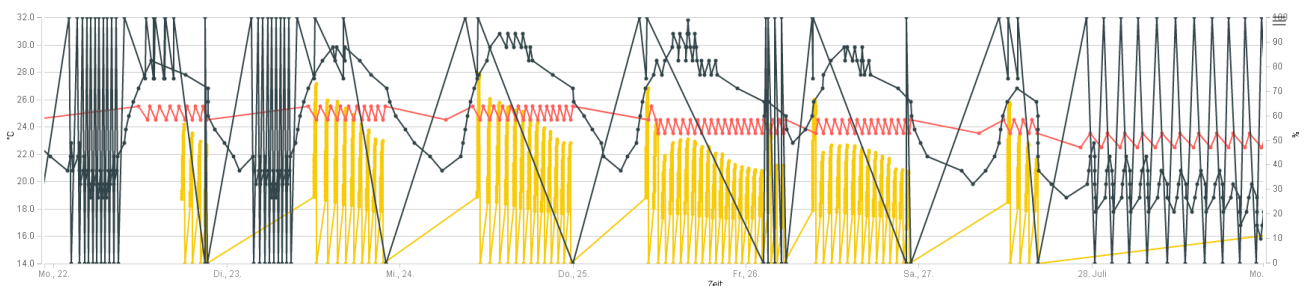


Abbildung 48: Reales Verhalten der bestehenden Lüftung- und Kälterege lung in der Woche vom 22. bis 29. Juli 2019. Gelb: Stellsignal Frequenzumformer Kompressor, rot: Raumtemperatur im SA-Raum, schwarz: Aussenlufttemperatur (linke Achse) und Stellsignal Umluftanteil (rechte Achse). Quelle: Auszug aus GLS-CH der SBB

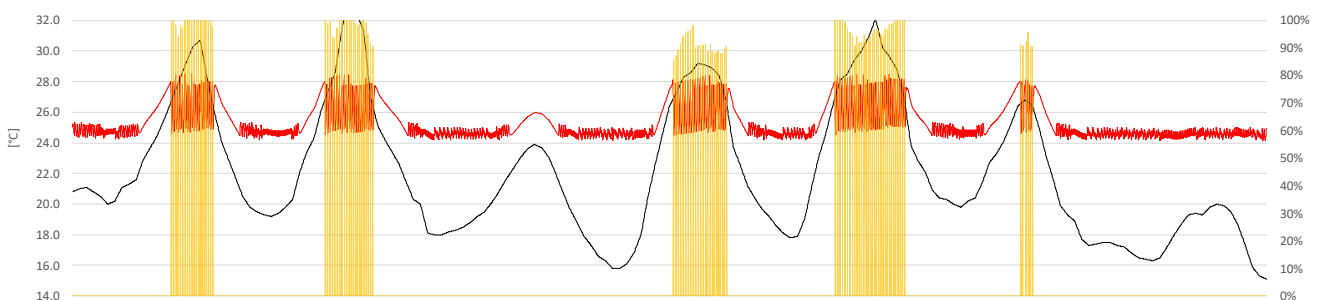


Abbildung 49: Modelliertes Verhalten der bestehenden Lüftung- und Kälterege lung in einer heissen Woche. Hell- und Dunkelblau: Kälteleistung ab Kältemaschine, rot: Raumtemperatur im SA-Raum, schwarz: Aussenlufttemperatur, grau und dunkelgrau.

⁵⁸ Die Verläufe sind erwartungsgemäss nicht deckungsgleich, da dem Modell synthetische Referenzklimadaten zugrunde liegen. Zudem ist die Aggregation der Daten in der Praxis (ca. 1 Wert pro Stunde) nicht gleich hoch wie im Modell (alle 3 Minuten).

4.5.1 Optimierte Regelung

Die im Abschnitt 4.5.1 erwähnten Nachteile der bestehenden Regelung geben die Stossrichtung für die Optimierungen der Lüftungs- und Kälterege- lung vor. **Wichtigste Verbesserung ist es, als Sollwertgeber für Luftmenge und die Wahl des Kältemodus (Free Cooling vs. mech. Kühlung) den effektiven Kältebedarf des Raumes zu verwenden.** Der Kältebedarf im BTG ist allerdings nicht direkt mittels eines Sensors im Raum messbar, sondern er muss über eine iterative Beobachtung der Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert angenähert werden. Der Verlauf der Sollwertabweichung über die Zeit gibt Auskunft, ob die erbrachte Kälteleistung ausreicht oder erhöht resp. reduziert werden sollte. Für solche Regelaufgaben sind sogenannte PID-Regler⁵⁹ geeignet. Ein PID-Regler ist ein Regelkreismechanismus mit Rückkopplung, welcher eine Stellgrösse aufgrund der laufenden Messung einer Regelabweichung fortlaufend anpasst.

Die folgende PID-Regelung für Lüftungs- und Kälteanlagen erfüllt diesen Zweck. Der Regler führt folgende Arbeitsschritte in jedem Zeitschritt aus:

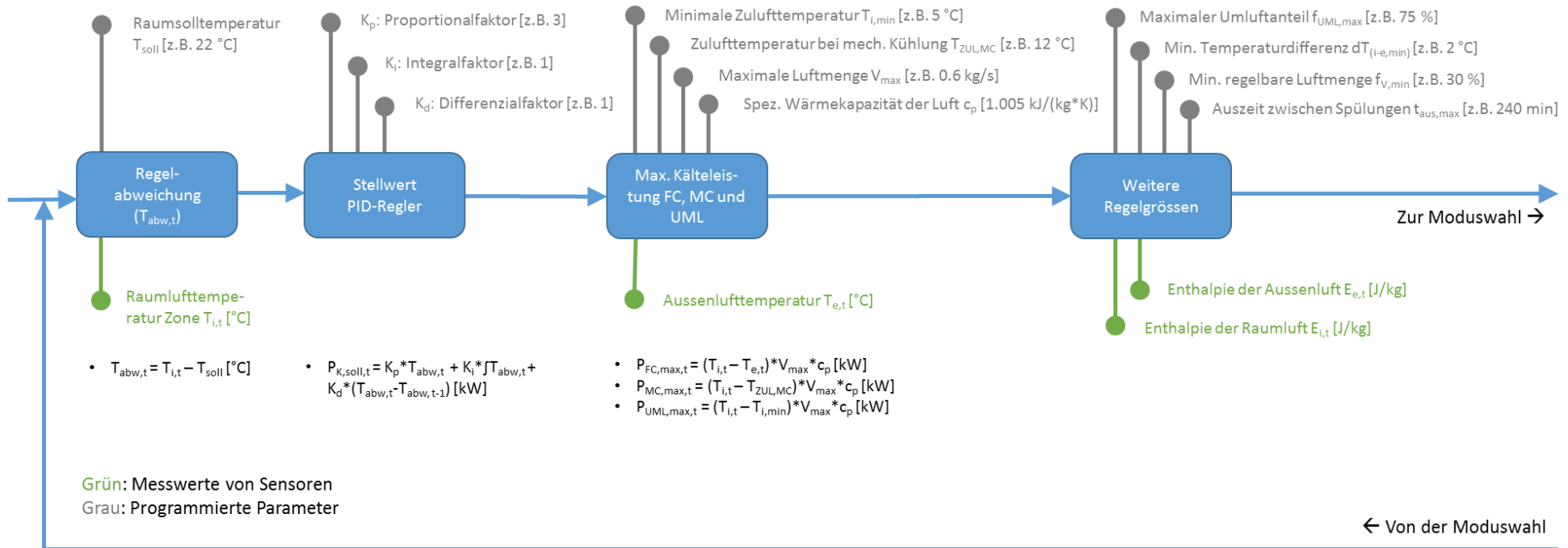
1. Messung der Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert.
2. Berechnung des Stellwerts für den zu deckenden Kältebedarf aus der Regelabweichung, dem Integral der Regelabweichung und ggf. der Differenz der Regelabweichung zum letzten Zeitschritt (PID-Regler).
3. Berechnung der maximal möglichen Kälteleistung über Free Cooling, mechanische Kühlung und im Umluftkühlmodus bei 100 % Luftmenge und den gegebenen Temperaturen und Vorgaben.
4. Entscheidung, welcher Modus gewählt wird aufgrund dessen Eignung zur Deckung des Bedarfs und dessen Effizienz (1. Priorität «Free Cooling» mit Aussenluft, 2. Priorität «Mechanische Kühlung»).
5. Berechnung der im gewählten Modus nötigen Luftmenge als Verhältnis zwischen maximal möglicher Kälteleistung (Schritt 3) und der Kälteanforderung (Schritt 2), Ermittlung des ggf. nötigen Umluftanteils bei zu tiefen Aussenlufttemperaturen oder einer Enthalpie der Aussenluft über derjenigen der Raumluft.
6. Zurück zu Schritt 1

Das Ablaufschema dieser Regelung ist in der Abbildung 50 und der Abbildung 51 dargestellt. Das Modul «PID-Regler» in der Abbildung 50 und das Modul «Moduswahl» in der Abbildung 51 sind über die dargestellten Pfeile verknüpft und laufen als Kreisprozess ab.

Es gilt zu beachten, dass selbst ein funktionierendes, zeitlich detailliertes Simulationsmodell grundsätzlich nicht unbedingt alle in der Realität erforderlichen Zustände abdeckt. Auch im dargestellten Regelkreis fehlen verschiedene Aspekte⁶⁰.

⁵⁹ PID steht für Proportional, Integral und Differenzial.

⁶⁰ Nicht abgebildet sind die detaillierten Regelungen zur Freigabe und zur Regelung der Kältemaschine (FU-geregelter Kompressor), HystereseFunktionen zur Vermeidung allfälliger Regleroszillationen, Notbetrieb und Brandschutzregelungen, Klappenstellungen im Auszustand und Anfahrregelungen für Antriebe.



Variablen

$P_{K,soll,t}$	Angeforderte Kälteleistung aus dem PID-Regler [kW]
$P_{FC,max}$	Maximal mögliche Kälteleistung im Modus 2 (Free Cooling) [kW]
$P_{MC,max}$	Maximal mögliche Kälteleistung im Modus 4 (mechanische Kälte) [kW]
$P_{UML,max}$	Maximal mögliche Kälteleistung im Modus 3 (Umluft) [kW]
f_{UML}	Umluftanteil [0 %... $f_{UML,max}$]
MC_{max}	Maximal mögliche Kälteleistung im Modus 4 (mechanische Kälte) [kW]
UML_{max}	Maximal mögliche Kälteleistung im Modus 3 (Umluft) [kW]

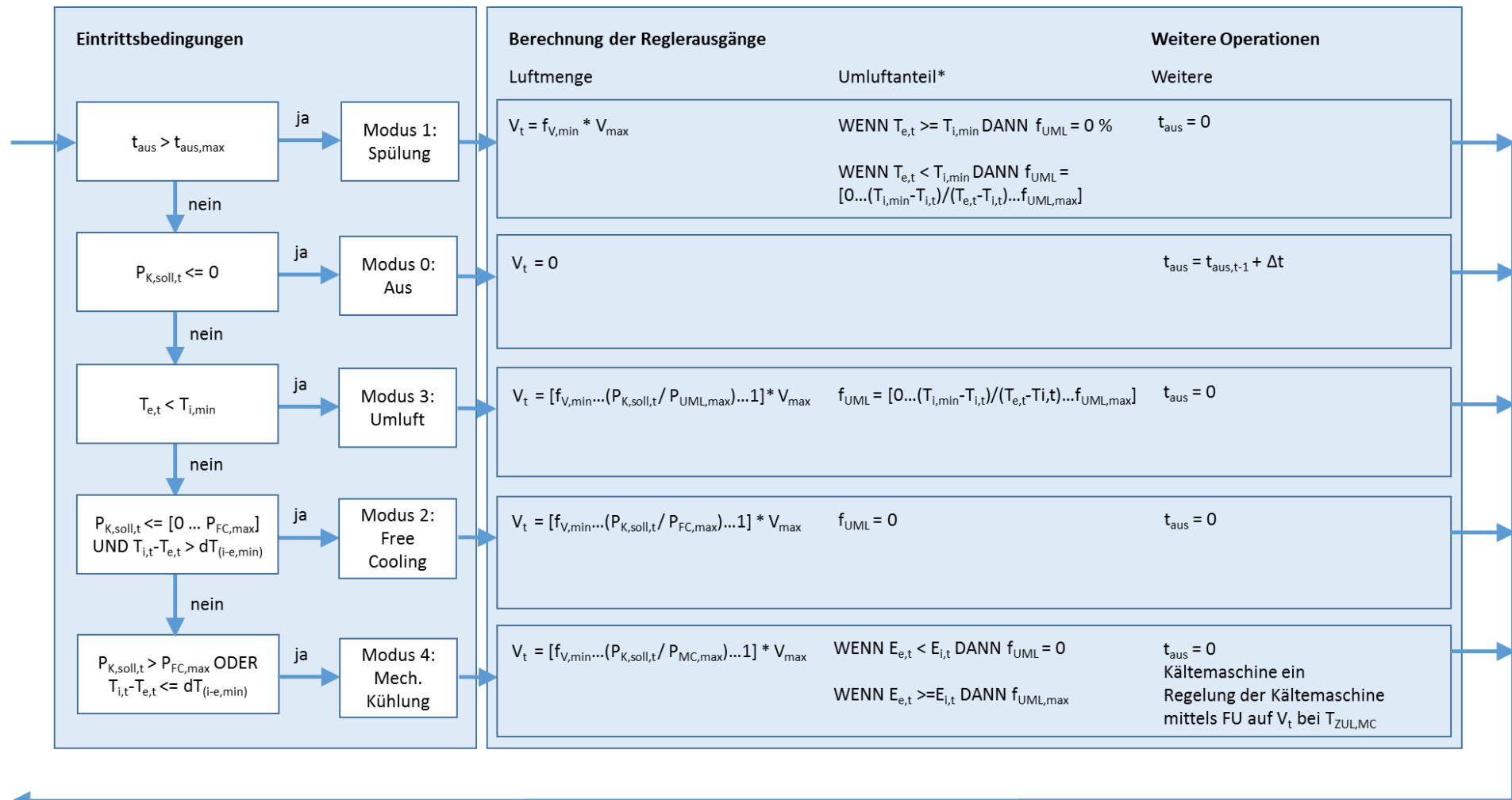
Bereich

[x...a...z]	Variable a kann Werte zwischen Minimum x und Maximum z annehmen
-------------	---

Indizes

t	aktueller Zeitschritt
t-1	vorheriger Zeitschritt
i	innen (Raum)
e	extern (Aussenluft)
soll	Sollwert
ZUL	Zuluft
MC	mechanische Kühlung
FC	freie Kühlung
UML	Umluft
K	Kälte

Abbildung 50: Modul «PID-Regler» der PID-Regelung für Lüftungs- und Kälteanlagen im Technikraum. Das Modul «Moduswahl» befindet sich auf der nächsten Seite.



* Umluft- und Aussenluftanteil ergeben zu jedem Zeitpunkt während dem Betrieb 100%.

Abbildung 51: Modul «Moduswahl» der PID-Regelung für Lüftungs- und Kälteanlagen im Technikraum. Das vorgeschaltete Modul «PID-Regler» befindet sich auf der vorherigen Seite.

In der dargestellten Regelung ist die Messung der Enthalpie der Raum- und Aussenluft als Kriterium zum Wechsel in den Umluftbetrieb im Kältemaschinenmodus abgebildet, weil sie in der bestehenden Regelung auch vorhanden ist. Die Verwendung des Enthalpiekriteriums lohnt sich gegenüber der Verwendung der Temperatur aber kaum, weil es eine aufwändigere Messsensorik voraussetzt. Der Mehrverbrauch bei einer Umschaltung des Umluftbetriebs auf der Basis der Lufttemperatur statt der Enthalpie beträgt ca. 1.5 % resp. einige Dutzend kWh Strom pro Jahr.

Die simulierte Stromeinsparung bei der HLK-Technik (Lüftungsantriebe und Kompressorkühlung) im BTG am Modell von «Netstal» durch die optimierte PID-Regelung gemäss Abbildung 50 und Abbildung 51 liegt bei über 50%⁶¹ (Abbildung 52).

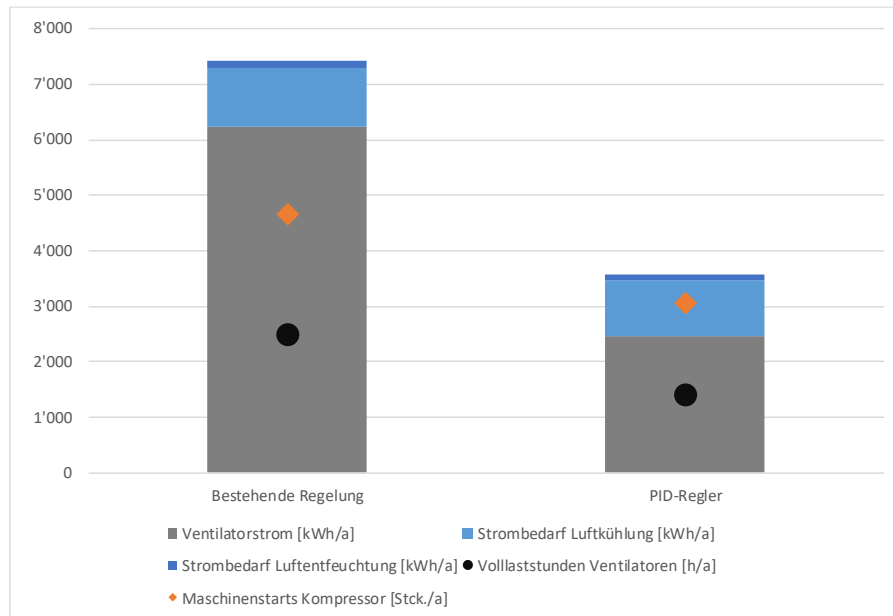
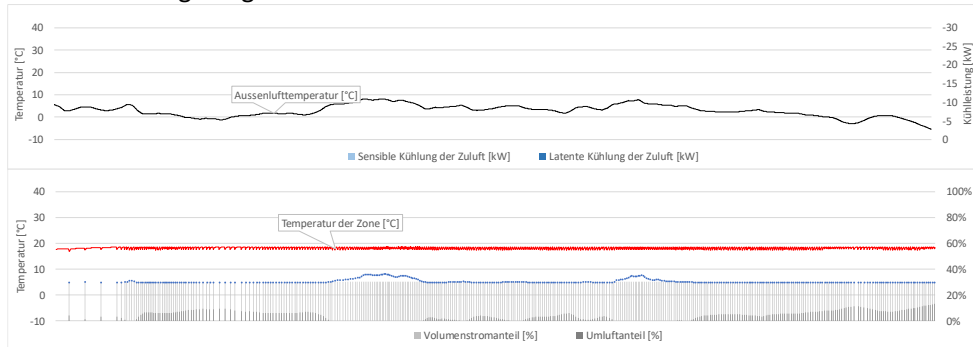


Abbildung 52: Stromeinsparung bei der HLK-Technik (Lüftungsantriebe und Kompressorkühlung) durch die optimierte PID-Regelung.

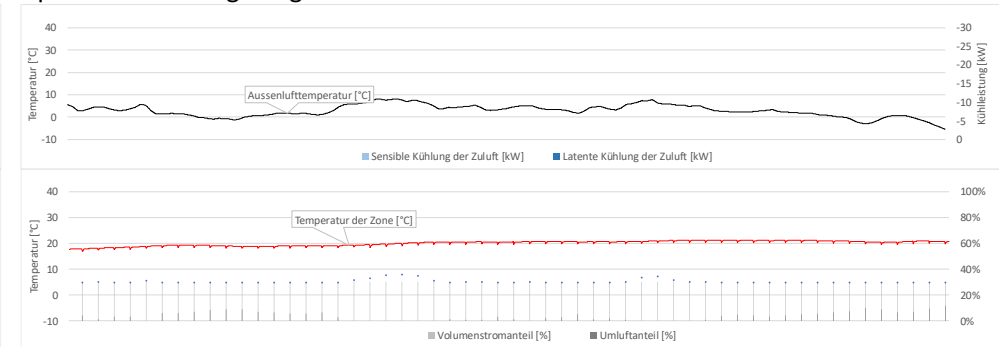
Die detaillierte Analyse des Reglerverhaltens (Abbildung 53 und Abbildung 54) bestätigt, dass die Einsparungen primär dadurch zustande kommen, dass weniger unnötige Luft umgewälzt wird, weil die Luftmenge in der PID-Regelung an den Modus und den effektiven Kältebedarf angepasst wird und nicht, wie in der bestehenden Regelung, in Abhängigkeit der Innen- und Aussenlufttemperatur geregelt wird. Dies wirkt sich in allen Jahreszeiten positiv aus. Die Volllaststunden der Lüftungsantriebe sinken durch die PID-Regelung um über 40 % bei einer Reduktion des Strombedarfs der Ventilatoren um 60 % (Abbildung 52).

⁶¹ Betonbau mit 5 cm Innendämmung, 0.15-fache Infiltration, Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 9.5-facher Luftwechsel, PID-Regelung, interne Last 35 W/m², Zulufttemperatur 12 °C bei mech. Kühlung, minimal 5 °C Zulufttemperatur im Winter.

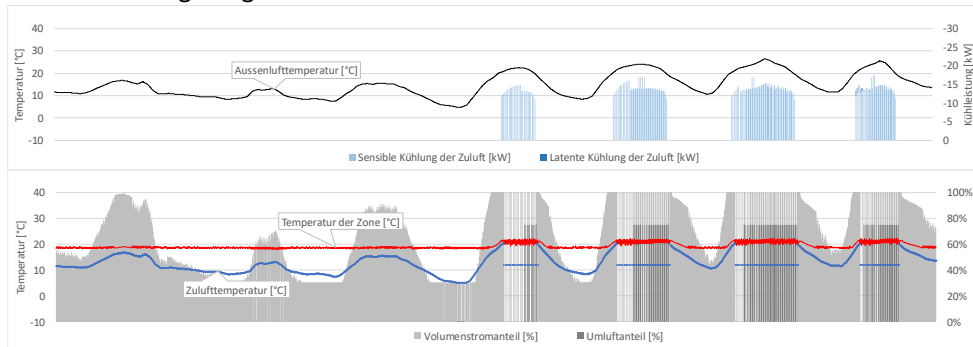
Woche 3 (Winter) Bestehende Regelung



Optimierte PID-Regelung



Woche 21 (Übergangsjahreszeit) Bestehende Regelung



Optimierte PID-Regelung

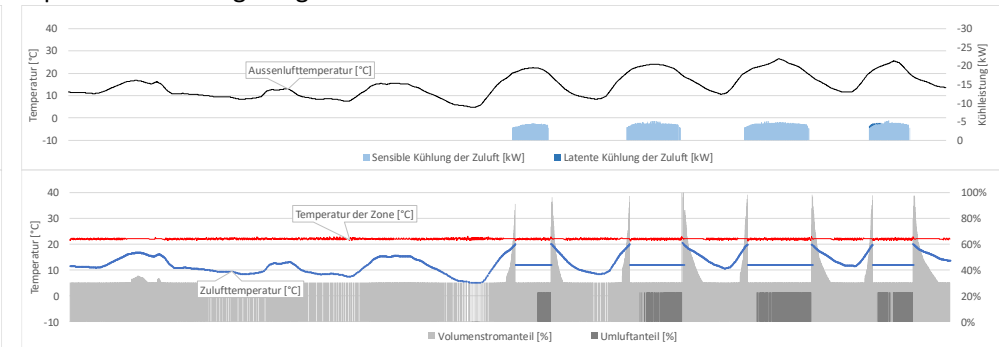
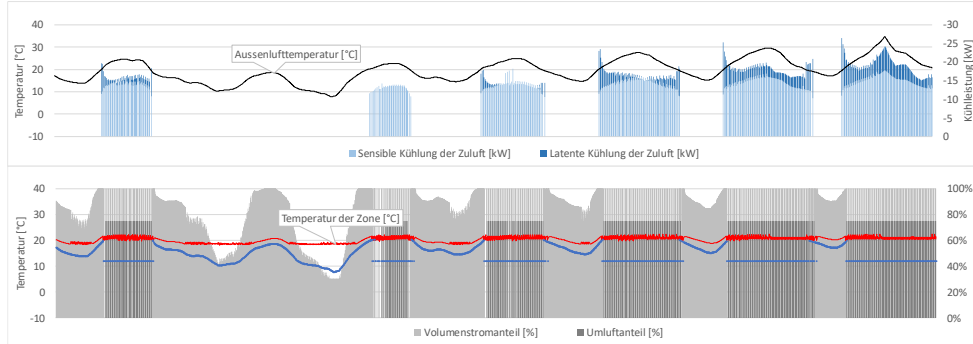


Abbildung 53: Vergleich des Reglerverhaltens der bestehenden Regelung (linke Spalte) und der optimierten PID-Regelung (rechte Spalte) in einer kalten Woche (obere Zeile) sowie einer Woche der Übergangsjahreszeit im Simulationsmodell⁶². In der jeweils oberen Grafik sind die mechanische Kälteleistung (hellblaue Balken) und die Aussentemperatur (schwarze Linie) dargestellt, in der unteren Grafik die Raumtemperatur (rote Linie), die Luftmenge (hellgraue Balken), der Umluftanteil (dunkelgraue Balken) sowie die Zulufttemperatur (blaue Linie).

⁶² Betonbau mit 5 cm Innendämmung, 0.15-fache Infiltration, Klima Zürich, 22 °C Raumsolltemperatur, 9.5-facher Luftwechsel, interne Last 26.5 W/m², Zulufttemperatur 12 °C bei mech. Kühlung, minimal 5 °C Zulufttemperatur im Winter. Bestehende Regelung: Free Cooling ab 18.5 °C Raumtemperatur und mech. Kühlung ab 21.5 °C.

Woche 30 (Sommer)

Bestehende Regelung



Optimierte PID-Regelung

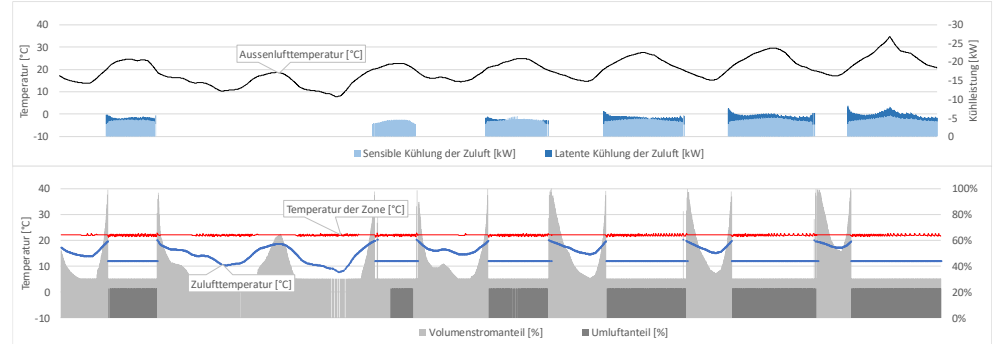


Abbildung 54: Vergleich des Reglerverhaltens der bestehenden Regelung (linke Spalte) und der optimierten PID-Regelung (rechte Spalte) in einer warmen Woche im Simulationsmodell⁶². In der jeweils oberen Grafik sind die mechanische Kälteleistung (hellblaue Balken) und die Aussentemperatur (schwarze Linie) dargestellt, in der unteren Grafik die Raumtemperatur (rote Linie), die Luftmenge (hellgraue Balken), der Umluftanteil (dunkelgraue Balken) sowie die Zulufttemperatur (blaue Linie).

Der optimierte Regler führt zu umso grösseren Energieeinsparungen für die Lüftung und Kühlung, je geringer die flächenspezifischen internen Lasten im Verhältnis zur maximalen Luftmenge sind (Abbildung 55). Da in bestehenden BTG häufig tiefe, spezifische interne Lasten bei gleichzeitig gross dimensionierten Lüftungs- und Kühlanlagen angetroffen werden (vgl. Abbildung 27 auf Seite 55), ist dies ein grosser Vorteil der optimierten Regelung für die Praxis.

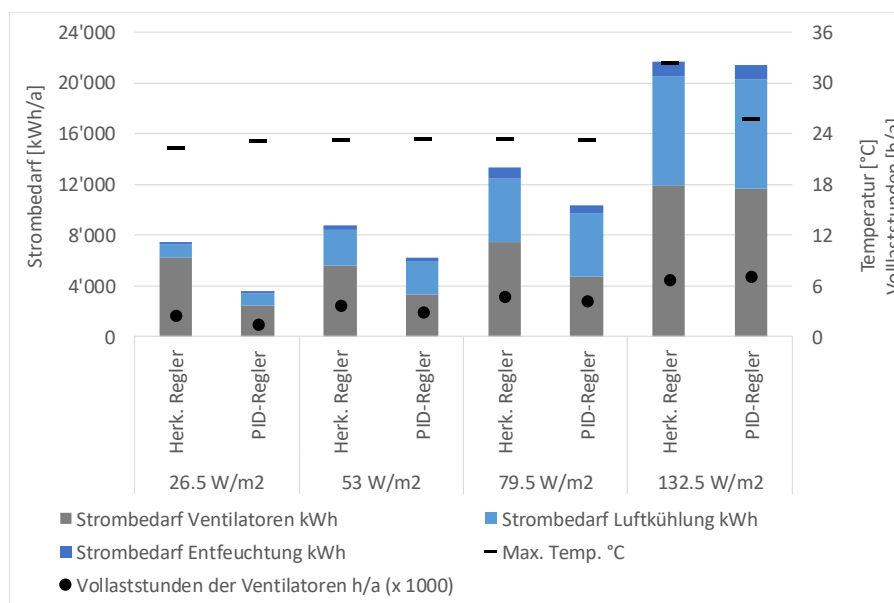


Abbildung 55: Stromeinsparungen durch den optimierten PID-Regler für Lüftung- und Klimakälte im BTG im Vergleich zu einem herkömmlichen Regler bei unterschiedlich hohen internen Lasten.

Bei hoher interner Last (z.B. in Altbauten) und knapper Dimensionierung der Lüftungs- und Kälteanlage ist die herkömmliche Regelungen energetisch zwar fast gleichgut (Tabelle 6), aber der optimierte Regler hält die Solltemperatur besser ein (Abbildung 55). Der herkömmliche Regler scheitert hier daran, bei tiefer Aussenlufttemperatur die Luftmenge zu erhöhen, wenn die internen Lasten zu einer Überhitzung führen, weil die Luftmenge an fixe Verhältnisse der Raum- und Aussenlufttemperaturen gekoppelt ist.

Der PUE des PID-Reglers liegt konstant bei 1.14 bis 1.18, während der herkömmliche Regler zwischen 1.36 (bei geringer interner Last) und 1.18 (bei sehr hoher interner Last) schwankt (Tabelle 6). Dies zeigt ebenfalls, dass sich der optimierte Regler besser an die individuelle Situation vor Ort anpassen kann.

Ebenfalls relevant ist, dass durch die PID-Regelung die Anzahl der Maschinenstarts des Kompressors⁶³ bereits bei minimaler Last von über 4'600 Starts/Jahr um rund einen Drittel reduziert werden kann. Bei höherer interner Last ist der

⁶³ In beiden Fällen ohne Massnahmen zur Verhinderung häufiger Starts, wie z.B. Sperrschaltungen oder Totbänder, d.h. eine Schaltung ist bei beiden Regelungen alle drei Minuten möglich.



Vorteil der PID-Regelung noch grösser. Dies erhöht die Lebensdauer der Kälteanlage und führt zu einem stabileren, gleichmässigeren Betrieb.

Tabelle 6: Weitere Vergleichsgrössen zwischen herkömmlichem und PID-Regler bei verschiedenen internen Lasten.

Interne Last	Regler	PUE	Stromeinsparung	Reduktion Maschinenstarts
26.5	Herk. Regler	1.36		
	PID-Regler	1.14	-52%	-34%
53	Herk. Regler	1.18		
	PID-Regler	1.12	-30%	-99%
79.5	Herk. Regler	1.19		
	PID-Regler	1.14	-23%	-100%
132.5	Herk. Regler	1.18		
	PID-Regler	1.18	-1%	-89%



4.6 Deckung des Eigenbedarfs mit Photovoltaik

BTG sind relativ grosse Stromverbraucher und weisen eine beträchtliche, elektrische Bandlast auf. Dies macht sie zu attraktiven Objekten für eine Ausrüstung mit Photovoltaik, weil der Ertrag einer PV-Anlage zu jeder Zeit zu einem relevanten Teil direkt vor Ort verbraucht werden kann. Wird die PV-Anlage so dimensioniert, dass sie als Spitzenleistung die elektrische Bandlast zu leisten vermag, dann ergeben sich unter den heutigen Rahmenbedingungen optimale wirtschaftliche Verhältnisse.

4.6.1 Dach- und Fassadenanlagen

Zwecks Optimierung der Belegung mit Photovoltaik wurde das gemessene Lastprofil des exemplarischen BTG «Netstal» am Netzanschlusspunkt im Jahr 2018 (53'062 kWh/a) in der Simulationssoftware Polysun modelliert und mit verschiedenen Fassaden- und Dachanlagen für ein BTG mit ähnlichen Dimensionen⁶⁴ kombiniert. Folgende Varianten wurden betrachtet:

- Variante 1: Belegung der Süd-, Ost-, und Westfassade
- Variante 2: Belegung des Dachs⁶⁵
- Variante 3: Belegung der Süd- und der Ostfassade

Die Erträge wurden mit Referenzklimadaten vom Standort Zürich simuliert. Es wurden Standardmodule mit 200 W/m² elektrischer Spitzenleistung und eine vollständige Belegung der freien Flächen angenommen. Die Ergebnisse der Ertragsberechnung der Varianten sind in der Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Ertragssimulation und Auswertung zum Eigenverbrauch, Autarkiegrad und Jahresbilanzanteil verschiedener PV-Varianten.

		Variante 1a Süd-, Ost- & Westfassade	Variante 2 Dach	Variante 3 Süd-, Ostfassade
Anzahl Module (à 1.63 m ²)	Stck.	84	44	68
Installierte Leistung (327 Wp pro Modul)	kWp	27.5	14.4	22.2
Jährlicher Ertrag der PV-Anlage	kWh/a	19'587	13'540	16'476
Ertrag pro kWp installierter Leistung	kWh/kWp	713	941	741
Eigenverbrauchsanteil PV		60%	73%	64%
Netzeinspeisung PV-Strom		40%	27%	36%
Autarkiegrad PV		22%	19%	20%
Netzbezug		78%	81%	80%
Jahresbilanz PV-Anteil		37%	26%	31%

Die Variante 1 führt im Vergleich mit knapp 19'600 kWh/a zum höchsten Gesamtertrag an PV-Strom, zum höchsten Autarkiegrad (22 %)⁶⁶ und zum höchsten Anteil an PV-Strom in der Jahresbilanz (37 %)⁶⁷. Im Gegenzug liegen aber

⁶⁴ Aussenmasse: Dach 20.99 m x 6.47 m, Nord- und Südfassade 20.99 m x 4.42 m, Ost- und Westfassade 6.47 m x 4.42 m, Tür auf der Nordseite, bei Variante 2 mit 40 % Abzug für Rückkühler, Randbereiche.

⁶⁵ Ost-West-Ausrichtung, 10° Anstellwinkel

⁶⁶ Der Autarkiegrad bezeichnet den Anteil des gesamten Strombedarfs, der über PV-Strom gedeckt werden kann (unter detaillierter Berücksichtigung der zeitlichen Komponente von Bedarf und Ertrag).

⁶⁷ Im Gegensatz zum Autarkiegrad wird beim PV-Anteil in der Jahresbilanz die zeitliche Komponente von Produktion und Verbrauch nicht berücksichtigt.

der Ertrag pro Modulfläche mit 713 kWh/kWp und der Eigenverbrauchsanteil mit 60 % im Vergleich am tiefsten. Dies sind eher ungünstige Ergebnisse im Hinblick auf eine wirtschaftliche Optimierung der Investition. Die zum Vergleich der Varianten aufgestellten, vereinfachten Jahreskosten zeigen dies: Variante 1 ist die Lösung mit den höchsten Jahreskosten, weil die grosse Fassadenanlage in der Investition relativ teuer ist und der spezifische Stromertrag tief bleibt (Tabelle 8)⁶⁸.

Tabelle 8: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsprüfung verschiedener PV-Varianten. Negative Werte bei den Jahreskosten sind Gewinne.

		Variante 1a Süd-, Ost- & Westfassade	Variante 2 Dach	Variante 3 Süd-, Ostfassade
Jährlicher Ertrag (Eigenverbrauch, Einspeisung)	CHF/a	2'225	1'701	1'930
Kapitalkosten	CHF/a	4'008	1'468	3'293
Jahreskosten	CHF/a	1'784	-234	1'363

Bei der Variante 3 werden nur zwei von drei günstigen⁶⁹ Fassadenflächen belegt. Dadurch sinken der Gesamtertrag an PV-Strom, der Autarkiegrad sowie der Anteil an PV-Strom in der Jahresbilanz, aber der Eigenverbrauchsanteil nimmt auf 64 % zu (Tabelle 7). Dies begünstigt die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage: Die Jahreskosten der Variante 3 liegen deutlich unter denjenigen der Variante 1 (Tabelle 8). Dennoch zeigt sich: **Die Mehrinvestitionen einer Fassadenanlage gegenüber einer Dachanlage stehen unter den geprüften Randbedingungen in einem ungünstigen Verhältnis zum Ertrag.**

Wirtschaftlich am besten schneidet die Variante 2 ab, bei der nur das Dach belegt wird. Um den Ertrag über den Tag besser zu verteilen, wurde eine Ost-West-Ausrichtung der Module mit 10 ° Anstellwinkel gewählt. **Mit dieser Lösung resultiert der geringste Gesamtertrag an PV-Strom, aber der höchste Eigenverbrauchsanteil** von 73 % (Tabelle 7). Diese Variante weist die mit Abstand besten Jahreskosten auf (Tabelle 8).

Neben dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis der heutigen Rahmenbedingungen (Einspeisevergütungen, Netzbezugstarife) bietet es sich jedoch an, auch eine längerfristige Betrachtung anzustellen. Eine individuelle, wirtschaftliche Optimierung jeder PV-Anlage für sich allein führt zu tendenziell kleinen Anlagen mit hohem Eigenverbrauchsanteil. Aus Sicht der Zielsetzung, in der Schweiz möglichst rasch und kostengünstig den Anteil an erneuerbarem Strom im Netz zu steigern, ist dies nicht zwingend die optimale Lösung, denn viele kleine Anlagen sind insgesamt teurer als wenige grosse. Auch scheint es ineffizient, Teilflächen neben bestehenden Anlagen nicht gleich mit zu belegen, denn die damit verbundenen Mehrkosten wären relativ gering. Die heutigen tarifären

⁶⁸ Berechnungsgrundlagen: Kapitalkosten als Annuität bei 3 % Zins und 30 Jahren Laufzeit (keine gesonderte Berücksichtigung der kürzeren Lebensdauer von Wechselrichtern), ohne Wartungskosten, Vergütung für Rücklieferung von PV-Strom 6 Rp/kWh, Tarif für Netzbezug 15 Rp./kWh. Spezifische Investitionskosten bei Fassadenanlagen gemäss Offerte für die Ausrüstung des next Generation BTG Pilots der SBB mit einer Fassaden-PV-Anlage in Spezialmodulen inkl. Unterkonstruktion, Wechselrichter, Elektroinstallationen, Planung und Montage, ohne Solarlog, 96 m² Fassadenfläche für ca. 79'000 CHF, Abzug für äusserste Fassadenschicht 150 CHF/m². Bei Dachanlagen 2'000 CHF/kWp.

⁶⁹ Die nördlich ausgerichtete Längsfassade weist derart geringe Erträge auf, dass eine Belegung nicht in Frage kommt.

Randbedingungen⁷⁰ führen also zu einer wirtschaftlichen Optimierung der individuellen Anlagen und damit zu eher kleinen, aber nicht zwingend systemdienlichen Anlagen. **Im Laufe der Lebensdauer einer PV-Anlage können sich aber die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen betreffend PV-Strom ändern:** Falls irgendwann im Winter produzierter PV-Strom stärker vergütet würde oder der Stromtarif für Netzstrom nachts und im Winter steigen würde, hätte die Variante 3 einen Vorteil, weil ihre Südfassade im Winter besonders viel Ertrag liefert (Abbildung 56).

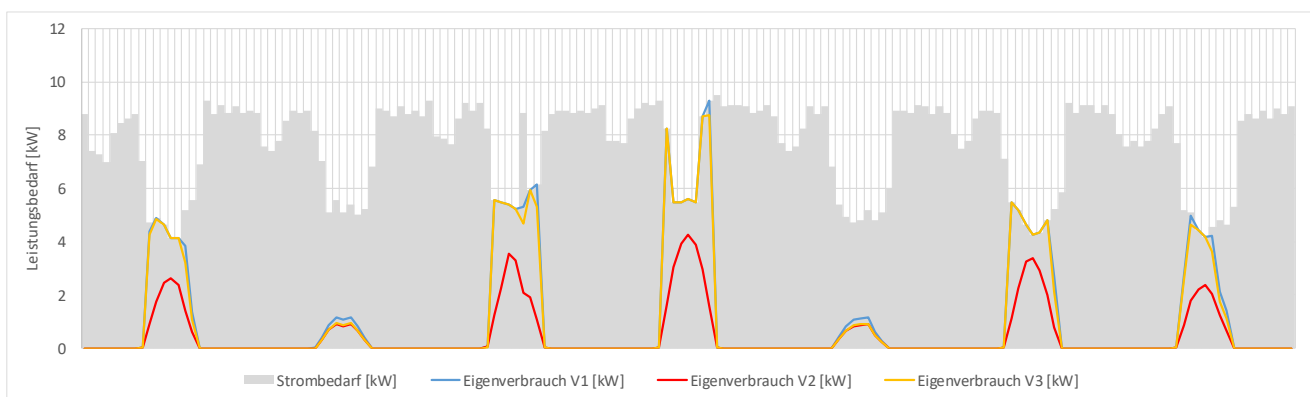


Abbildung 56: Strombedarf und Deckung durch PV-Strom während einer Winterwoche in Abhängigkeit der Variante (Fassaden- und Dachanlage). Die Fassadenanlagen (blau und gelb) liefern im Winter deutlich mehr vor Ort nutzbaren Strom als die Dachanlage (rot).

4.6.2 Nutzen von Batteriespeichern

Durch den Einsatz eines Batteriespeichers können der Eigenverbrauch und die Autarkie (resp. die optimale PV-Anlagengrösse) weiter gesteigert werden. Das bereits im Abschnitt 4.6.1 modellierte BTG wurde hierzu in der Variante 1a (Fassaden-PV-Anlage mit 27.5 kWp Leistung) mit drei verschiedenen grossen Batterien zwischen 7.7 und 23.1 kWh Kapazität ausgerüstet. Wiederum wurden der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad als wichtige Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage ermittelt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Variation der Batteriespeicherkapazität und Auswirkungen auf Eigenverbrauch und Autarkiegrad.

		Variante 1a	Variante 1b	Variante 1c	Variante 1d
		Süd-, Ost- & Westfassade	Süd-, Ost- & Westfassade	Süd-, Ost- & Westfassade	Süd-, Ost- & Westfassade
		Keine Batterie	7.7 kWh Batterie	15.4 kWh Batterie	23.1 kWh Batterie
Installierte Leistung (327 Wp pro Modul)	kWp	27.5	27.5	27.5	27.5
Jährlicher Ertrag der PV-Anlage	kWh/a	19'587	19'587	19'587	19'587
Batteriegrösse	kWh		7.7	15.4	23.1
Eigenverbrauchsanteil PV		60%	71%	79%	85%
Netzeinspeisung PV-Strom		40%	29%	21%	15%
Autarkiegrad PV		22%	26%	29%	31%
Netzbezug		78%	74%	71%	69%

Die Simulationen zeigen, dass der Grenznutzen zusätzlicher Speicherkapazität im vorliegenden Fall stark abnimmt. Mit 7.7 kWh Batteriekapazität kann der Eigenverbrauchsanteil noch um 11 % auf 71 % gesteigert werden. Eine Verdoppe-

⁷⁰ Strombezugstarife, Einspeisevergütungen

lung der Batteriekapazität auf 15.4 kWh bringt nur noch zusätzliche 8 % Eigenverbrauchsanteil, die Verdreifachung 14%. **Der deutlich abnehmende Grenznutzen der Batteriekapazität ist auf den bereits ohne Batterie recht hohen Eigenverbrauchsanteil von 60 % zurückzuführen und begrenzt den wirtschaftlichen Nutzen einer Batterie.** Unter den angenommenen Rahmenbedingungen⁷¹ ist keine der Lösungen mit Batteriespeicher wirtschaftlich attraktiv (Tabelle 10), am besten schneidet die Lösung ohne Batterie ab.

Tabelle 10: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsprüfung verschiedener Batteriespeichergrossen

		Variante 1a Süd-, Ost- & Westfassade	Variante 1b Süd-, Ost- & Westfassade	Variante 1c Süd-, Ost- & Westfassade	Variante 1d Süd-, Ost- & Westfassade
Jährlicher Ertrag (Eigenverbrauch, Einspeisung)	CHF/a	2'225	2'418	2'561	2'670
Kapitalkosten	CHF/a	4'008	4'911	5'453	5'904
Jahreskosten	CHF/a	1'784	2'493	2'892	3'234

Im Projektverlauf wurde eine Pilotanlage der BLS mit einer sogenannten Salz-batterie besichtigt, welche die Batterie neben der Funktion als USV-Energiequelle auch zur Eigenverbrauchsoptimierung der PV-Anlage nutzt.



*Abbildung 57: Schaltstation der BLS in Holligen bei Bern mit PV-Anlage und Salz-batterie als Energiespeicher für die USV-Anlage und zur Eigenverbrauchsoptimierung der PV-Anlage.
Quelle: Innovenergy GmbH*

Die **Doppelnutzung einer bereits vorhandenen Batterie einer USV** scheint auf den ersten Blick attraktiv. Es gilt allerdings die Bedingung, dass die Batterie der USV zu jeder Zeit eine definierte Energiemenge vorhalten muss, um über einen gewissen Zeitraum das BTG netzunabhängig mit Strom ab Batterie zu versorgen. Auf diesen Zeitraum und die anfallende Last ist die Batteriegrösse im Idealfall dimensioniert. Eine Entladung der Batterie unter den vorzuhaltenden Wert zur Eigenverbrauchsoptimierung würde den unterbrechungsfreien Betrieb des BTG bei Netzausfall gefährden. **Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Batterie der**

⁷¹ Siehe Fussnote 68 auf Seite 55 und Investitionskosten Batterie zwischen 1000 CHF/kWh (7.7 kWh) bis 700 CHF/kWh (23.1 kWh), Annuität der Batterie bei 3 % Zins und 10 Jahren Lebensdauer.



USV für die Eigenverbrauchsoptimierung einer PV-Anlage grösser dimensioniert werden müsste. Ein effektiver Doppelnutzen ergibt sich allenfalls nur noch dadurch, dass Installationen wie Wechselrichter oder Elektroinstallationen für beide Systeme genutzt werden können. Eine weitere Möglichkeit für einen Doppelnutzen wird durch die SBB geprüft: Da auch bei den USV-Batterien in der Realität die Batteriekapazität aufgrund fehlender, präziser Lastfalldaten zu gross dimensioniert wird, könnte durch Messung des realen Lastfalls im Betrieb eine Überschusskapazität der Batterie ermittelt und für die Eigenverbrauchsoptimierung freigegeben werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das BTG eine ideale Umgebung bietet, um eine PV-Anlage mit hohem Eigenverbrauch und damit unter heutigen Rahmenbedingungen guter Wirtschaftlichkeit zu installieren. Unter den heutigen Rahmenbedingungen ist eine klein dimensionierte Dachanlage wirtschaftlich am attraktivsten, aber grössere Fassadenanlagen könnten noch mehr zu übergeordneten Zielen beitragen. **Eine objektbezogene, individuelle wirtschaftliche Optimierung birgt das Risiko, viele kleine und pro Fläche teure Einzelanlagen zu erstellen, welche in der Summe teurer sind als weniger, aber dafür grössere Anlagen.**



5. ANHÄNGE

5.1 Arbeitspakete

Das Vorhaben gliedert sich in drei Teile mit definierten Arbeitspaketen. Im Folgenden werden die geplanten Arbeiten kurz beschrieben.

Teil 1: Theoretische Basis

- 1.1. Erfassung und Charakterisierung der Bahntechnikstandorte in Zusammenarbeit mit den beteiligten Bahnunternehmen, Kategorisierung sowie Auswahl der später vertieft zu analysierenden Standorte. Die Identifikation und Auswahl erfolgt im Rahmen eines Workshops anhand vordefinierter Kriterien.
 - Beschaffung von Verbrauchswerten (Strom, Kälte, Wärme)
 - Aufteilung des Verbrauchs in Nutzungen (Bahntechnik, Lüftung, Kälteerzeugung)
 - Ermittlung der Auslegung und der im Betrieb effektiv resultierenden spezifischen internen elektrischen Lasten (Wärmelasten)
- 1.2. Analyse bahninterner Projektierungsvorgaben (Richtlinien, Regelwerke, Weisungen) für Bahntechnikgebäude und Bewertung der geltenden HLK⁷²-Anforderungen. Vergleich von Ist-Zustand und Stand der Technik für relevante Prozesse und Technologien.
 - Luftmengen, Solltemperaturen resp. Temperaturbereiche
 - Anforderungen durch Batterien (Mindestluftwechsel)
- 1.3. Identifikation der erfolgsrelevanten Randbedingungen (Form, Adressaten, Implementierung) und Strategien für den Leitfaden an der Schnittstelle zwischen Gebäude, Haustechnik und Bahntechnik.
 - Dieses Arbeitspaket wird durch die Masterarbeit von M. Nikolic (SBB) bearbeitet

Teil 2: Praktische Umsetzung

- 2.1. Planung und Umsetzung der Messkampagne zum detaillierten Verständnis der Energieflüsse der ausgewählten Standorte unter Mitwirkung der beteiligten Partner sowie externer Spezialisten. Analyse der vorhandenen Energiekennwerte der ausgewählten Standorte, Identifikation von Lücken.
 - Ermittlung von Messwerten zum Energiebedarf über das schweizweite Gebäudeleitsystem (GLS-CH) der SBB
 - Modellierung eines typischen BTG in einer dynamischen Simulationsumgebung inkl. detaillierter Abbildung der Regelung von HLK-Systemen
- 2.2. Identifizierung von Effizienzpotentialen, Optimierungsmassnahmen, Potenzial zum Eigenverbrauch von selbst produzierter, erneuerbarer Energie. Erarbeitung von Methoden und Werkzeugen zur Potenzialabschätzung, Dimensionierung und Bewertung von Massnahmen im Einzelfall.
 - Prüfung am Simulationsmodell von möglichen Effizienzmassnahmen an der Gebäudehülle, an den HLK-Anlagen, an der Regelung und für die Eigenstromerzeugung

⁷² HLK: Heizung, Lüftung, Klimakälte

- 
-
- 2.3. Gruppierung und Bewertung der Massnahmenpotenziale pro Standort, Bestimmung der kritischen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung, Strukturierung von Massnahmenpaketen als Basis für den Leitfaden.

Teil 3: Abstraktion der Ergebnisse und Kommunikation

- 3.1. Abschätzung des Effizienz- und Erzeugungspotenzials für gemäss dem Leitfaden optimierte Bahntechnikgebäude gegenüber Standorten gemäss bestehender Projektierungsvorschriften, Hochrechnung des Potenzials auf alle Bahntechnikstandorte der beteiligten Schweizer Bahnunternehmen.
- 3.2. Gliederung und Zusammenfassung der Erkenntnisse in einem Leitfaden zuhanden aller Schweizer Bahnen. Der Leitfaden wird gemäss den Erkenntnissen des Arbeitsschritts 1.3 strukturiert.
- 3.3. Streuung der Erkenntnisse im Rahmen der Arbeitsgruppe Energieeffizienz des Verbands des öffentlichen Verkehrs (VöV), Veröffentlichung des Leitfadens zur Nutzung durch Bahnunternehmen und Dienstleister derselben.

5.2 Zeitplan

Die Bearbeitung erfolgte zwischen September 2018 und Juli 2020 gemäss dem Phasenplan in der Abbildung 58.

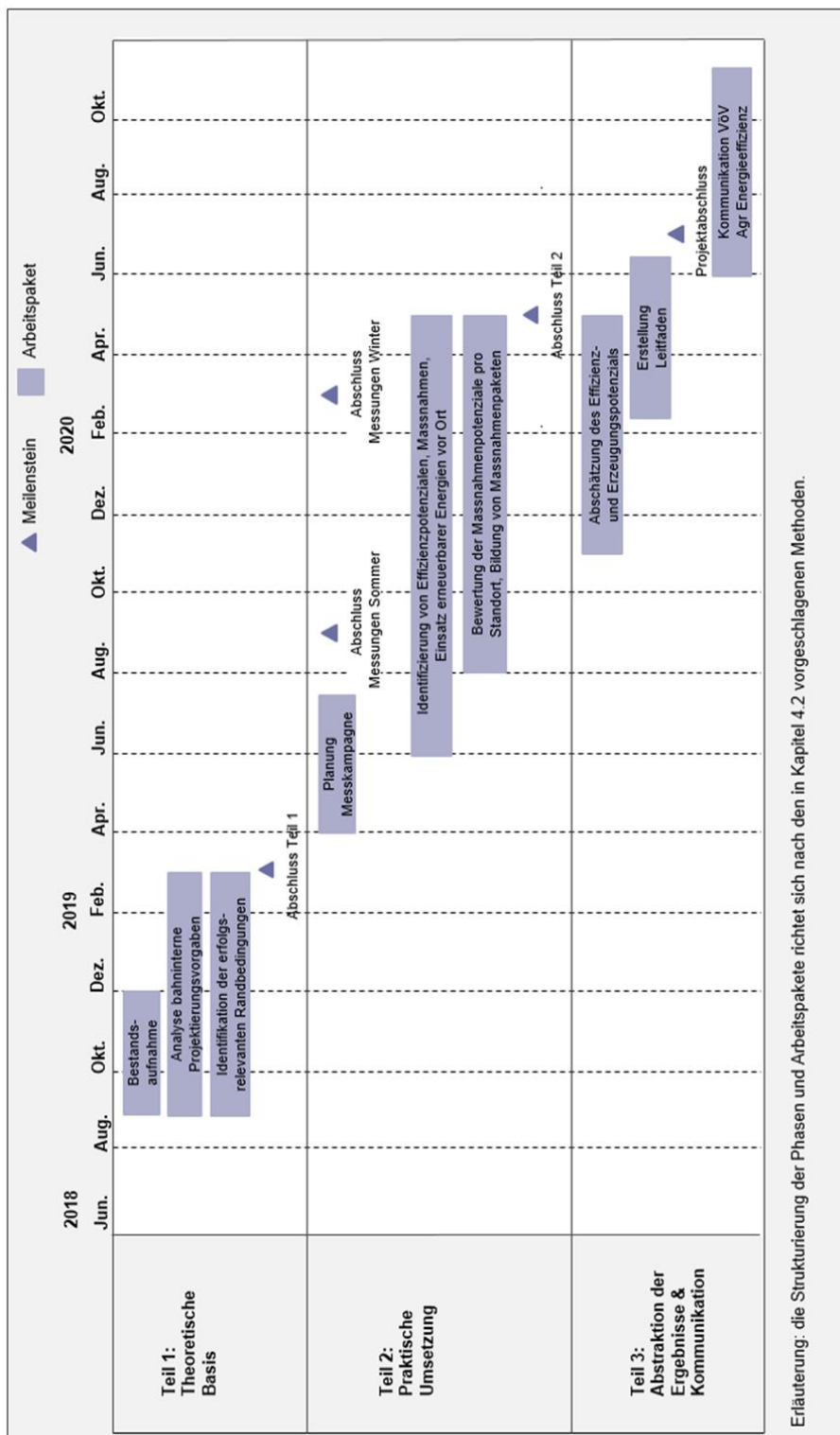


Abbildung 58: Phasenplan gemäss Projektantrag vom 17.9.2018