

DIS-Projekt Nr. 42259 DIS-Vertrags Nr. 83027 ENET-Nr. 240034	Umgebungswärme, WKK, Kälte Pilot- und Demonstrationsanlagen	Bundesamt für Energie BFE
--	--	------------------------------

Schlussbericht Februar 2004

# Kälteverbund Bahnhof Bern

Energiecontracting mit Absorptionskältemaschinen

ausgearbeitet durch  
Martin Bretscher  
Energie Wasser Bern, Energiedienstleistungen  
Monbijoustrasse 11, Postfach, 3001 Bern



Dieser Artikel ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichtes verantwortlich.

# 1. Zusammenfassung

Die energiepolitischen Vorgaben der Standortgemeinde Bern, welche im Massnahmenplan festgehalten sind, verfolgen unter anderem das Ziel, durch technisch innovative Lösungen zunehmend einen Beitrag zur Reinhaltung der Luft zu leisten. Basierend vor diesem Hintergrund wurde die Idee generiert, die freie Abwärme der Kehrlichtverbrennungsanlage der Stadt Bern in den Sommermonaten zur Produktion von Kaltwasser zu verwenden.

Bereits 1998, als zum ersten Mal die umfassende Sanierung des Bahnhofs Bern diskutiert wurde, wurde das Thema der Kaltwasserproduktion mittels Absorptionsprinzip durch Energie Wasser Bern eingebracht.

In einer Vorstudie wurde alsdann die Machbarkeit einer Kälteproduktionsanlage genauer untersucht und aufgezeigt, dass sich neben der SBB der Einbezug von weiteren Kaltwasserbezüglern, insbesondere Bandlastbezüglern, wirtschaftlich positiv auf den resultierenden Kältepreis auswirkt. Die Anfragen und Abklärungen bei den direkt angrenzenden Grundeigentümern zeigte, dass verschiedenen Sanierungsarbeiten bei den Kälteproduktionsanlagen anstanden und somit ein Interesse an einer gemeinsamen Lösung nicht von Beginn weg ausgeschlossen wurde.

Die Projektentwicklung wurde durch die SBB, den Kanton Bern und die Stadt Bern ausgelöst mit dem Ziel, die notwendigen Entscheidungsunterlagen zu erhalten. Dabei ging es neben der Beantwortung von wirtschaftlichen Fragen betreffend Kältepreis auch um das Thema Energiecontracting, welches durch Energie Wasser Bern als Lieferantin der Fernwärme zur Kälteproduktion eingebracht wurde. Anhand der ausgearbeiteten Unterlagen durch das Ingenieurbüro KIWI AG Dübendorf entschieden sich die drei Bauherrschaften SBB, Kanton und Stadt zur zentralen Kälteproduktion mittels Absorptionskälteanlage und zur Contractinglösung.

Als idealer Standort für die neue Kälteproduktionszentrale bot sich der Raum im Untergeschoss des Aufnahmegebäudes SBB an, welcher in unmittelbarer Nähe der Heizzentrale liegt. Zudem konnte die bestehende Kältezentrale im Rechenzentrum übernommen und in den Verbund integriert werden.

Etappenweise, abhängig vom Anschlusszeitpunkt der Gebäude, wurde der Kälteverbund von Herbst 2001 bis Oktober 2003 realisiert. Dabei gilt es festzuhalten, dass die Christoffelunterführung erst provisorisch und der Gebäudekomplex Bollwerk Mitte erst 2007 in das Kaltwasserverbundsystem integriert wird.

Die ersten Betriebserfahrungen zeigen, dass die Einbindung von Absorptionskältemaschinen in Kaltwasserverbundsysteme regeltechnisch nicht ganz einfach ausfällt. Grundsätzlich verfügen die Maschinen über ausgezeichnete regeltechnische Eigenschaften und lassen sich problemlos bei konstanter Produktionstemperatur stufenlos fahren. Das parallele Betreiben von zwei Maschinen und das exakte Einhalten der konstanten Kaltwassertemperatur bei veränderlicher Rücklauftemperatur stellen jedoch bei der Anlage im Bahnhof Bern höchste Anforderungen an die Regeltechnik.

Bis zum vorläufigen Bauabschluss im Herbst 2003 wurden rund Fr. 5.2 Mio. in die Kälteverbundanlage investiert. Verantwortlich für die Finanzierung, den Betrieb, die Instandhaltung und Instandsetzung ist Energie Wasser Bern als durch die Kältebezüglern beauftragter Energiecontractor. Die vertragliche Zuständigkeit wurde auf 20 Jahren festgelegt.

Der Kältepreis wurde durch den Contractor kalkuliert. Er setzt sich aus den beiden Komponenten Grund- und Arbeitspreis zusammen. Im Grundpreis werden die fixen Kostenanteile, also der Jahreskapitalzins und die fixen Betriebskosten abgebildet. Der Arbeitspreis umfasst die variablen Kosten, also hauptsächlich die Aufwendungen für Primärenergie.

## Abstract

The energy policy of the municipality of Berne aims to create innovative technical solutions which contribute to the reduction of air pollution. This led to the idea to utilise part of the free waste heat of the city's waste incineration plant for the production of cold water.

The subject of cold water production was already raised by *Energie Wasser Bern* in 1998. A pilot study examined the feasibility of a cold energy production unit, and consultations with land owners revealed interest in a joint solution.

Project development was initiated by SBB, the Canton of Berne and the City of Berne. On the basis of the documentation produced by the engineering company *KIWI AG in Dübendorf*, the three constructors decided to implement central cold energy production using an absorption-type refrigerating installation in a contracting solution.

The new cold energy production centre is ideally located in the basement of the SBB station main building where it was possible to integrate the existing refrigerating installation of the computer centre in the combined system.

Initial operating experiences demonstrate that the incorporation of absorption-type refrigerating units in interconnected cold water systems is not quite so easy. Parallel operation of two units and precise adherence to the constant cold water temperature with a fluctuating return temperature places extreme demands on the control engineering of the installation.

Approximately CHF 5.2 million have been invested in the combined cold energy installation up to autumn 2003. *Energie Wasser Bern* is responsible for financing, operating, maintenance and repair for a period of 20 years.

The cold energy price calculated by the contractor is made up of the two components: base and operating rates. The base rate represents the fixed cost parts, i.e. the annual interest on capital and the fixed operating costs. The operating rate comprises the variable costs (mainly for primary energy).

# 1. Résumé

Les principes de politique énergétique de la commune hôte de Berne, définis dans le plan des mesures, ont pour objectif de contribuer, entre autres, de manière accrue au maintien de la pureté de l'air à l'aide de solutions techniques innovantes. Sur cette base, l'idée est née de produire au cours des mois d'été de l'eau froide en utilisant la chaleur libérée par l'installation d'incinération des ordures de la ville de Berne. En 1998 déjà, lors de la discussion autour du premier assainissement complet de la gare de Berne, *Energie Wasser Bern* avait évoqué la possibilité produire de l'eau froide à l'aide du principe d'absorption. Lorsque, au cours d'une étude préalable, la faisabilité d'une installation de production de froid a été étudiée de plus près, il est apparu qu'à part les CFF, d'autres consommateurs d'eau froide, en particulier des consommateurs permanents, pouvaient avoir une influence économique positive sur le prix du froid ainsi généré. Les demandes et les éclaircissements effectués auprès des propriétaires fonciers directement voisins ont montré que différents travaux d'assainissement sur des installations de production de froid existantes étaient en attente et que l'intérêt pour une solution commune n'était donc pas exclue a priori.

L'étude du projet a été déclenchée par les CFF, le canton de Berne et la ville de Berne dans le but d'établir les documents de décision nécessaires. A part la réponse aux questions économiques concernant le prix du froid, le thème du contracting de l'énergie a été introduit par *Energie Wasser Bern* en tant que fournisseur de chauffage à distance. Sur la base des documents élaborés par le bureau d'ingénieurs *KIWI AG Dübendorf*, les trois maîtres de l'ouvrage, CFF, canton et ville de Berne, se sont décidés pour une production de froid centralisée à l'aide d'une installation frigorifique par absorption et pour une solution de contracting.

Le local adjacent à la centrale de chauffage, situé au sous-sol du bâtiment principal des CFF, constituait un emplacement idéal pour la nouvelle installation de production de froid. La centrale de froid existante a pu être placée dans le centre de calcul et intégrée au groupement. Le groupement de froid a été constitué par étapes entre l'automne 2001 et le mois d'octobre 2003, en fonction du calendrier de raccordement. Il est à noter que le passage souterrain de Christoffel ne sera intégré d'abord que provisoirement au groupement d'eau froide et le complexe immobilier *Bollwerk Mitte* n'y sera intégré qu'en 2007.

Les premières expériences d'exploitation montrent que l'intégration des machines à absorption dans le système du groupement d'eau froide n'est pas une affaire très simple du point de vue de la technique de régulation. En principe, les machines disposent individuellement d'excellentes caractéristiques de régulation et peuvent être commandées sans difficulté en continu pour une température de production constante. Dans le cas de deux machines travaillant en parallèle, le maintien d'une température constante lorsque la température de l'eau de retour varie, exige pour l'installation de la gare de Berne des caractéristiques de régulation très sévères.

Jusqu'à l'achèvement provisoire de la construction en automne 2003, il a été investi un montant de CHF 5,2 millions dans l'installation de production de froid. *Energie Wasser Bern* a été mandaté par les consommateurs du froid pour assurer le financement, l'exploitation, la maintenance et la mise en service ainsi que pour le contracting d'énergie. La durée de la responsabilité contractuelle a été fixée à 20 ans.

Le prix du froid sera calculé par le fournisseur contractuel. Il comporte deux composants : le prix de base et le prix du travail. Le prix de base englobe les éléments fixes tels que les intérêts annuels du capital et les frais d'exploitation fixes. Le prix du travail comporte les coûts variables, essentiellement les coûts de l'énergie primaire.

## 2. Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	2
2. Inhaltsverzeichnis.....	5
3. Ausgangslage .....	6
3.1. Energiecontracting .....	7
3.2. Die Projektidee.....	7
4. Ausgeführtes Projekt.....	11
4.1. Etappierung der Kaltwasserversorgungsanlage .....	11
4.2. Dimensionierung der Kälteproduktionsanlage .....	12
4.3. Fernleitungen.....	12
4.4. Prinzipschema Kälteverbund Bahnhof Bern .....	13
5. Betriebsergebnisse .....	14
5.1. Energiebilanz .....	14
5.2. Betrieb der Kälteproduktionsanlage.....	17
5.2.1. Absorptionskältemaschinen.....	17
5.2.2. Kolbenverdichter – Kältemaschinen .....	18
5.2.3. Kaltwasserverteilsystem und Kälteübergabestationen .....	18
6. Investitionskosten und Finanzierung.....	20
7. Verrechnungsbasis .....	21
8. Organisation/Betriebsüberwachung/Betriebssicherheit .....	21

### 3. Ausgangslage

Der Bahnhof Bern wurde - auch im Hinblick auf die Expo 2002 - ab Herbst 2001 umgebaut und umfassend saniert. Mehrere Mieter der SBB-Liegenschaften, darunter auch die Genossenschaft Migros Aare, die eine grössere Fläche des umfassend sanierten und erneuerten Bahnhofs belegt, hatte klare Bedingungen bezüglich der Bereitstellung gewerblicher Kälte sowie der Klimatisierung der beanspruchten Räume formuliert. Gestützt auf umfangreiche Abklärungen haben sich die SBB entschlossen, die teilweise veralteten, mit Strom betriebenen Kälteanlagen durch *Absorptionskältemaschinen* zu ersetzen. Antriebsenergie der geplanten Kälteanlagen ist mehrheitlich erneuerbare bzw. regenerierbare (Fern-)Wärme aus der Kehrlichtentsorgungsanlage der Stadt Bern, was ökologisch sinnvoll ist und der KVA Bern dringend benötigten Fernwärmeabsatz sichert, wird doch die Kälte vorwiegend in den Sommermonaten benötigt.

In einer ersten Studie wurde die Machbarkeit eines Kaltwasserverbundsystems genauer analysiert. Dabei zeigte sich rasch, dass aus wirtschaftlichen Überlegungen der Versorgungsperimeter über die Gebäudegrenzen des Aufnahmegebäudes des Bahnhofs Bern auf die umliegenden Gebäudeteile – Unterführungen mit Ladenlokalitäten, Rechenzentrum SBB, Büroräumlichkeiten in der Randüberbauung Grosse Schanze AG, Universität Bern, Hotel Schweizerhof – ausgedehnt werden muss.

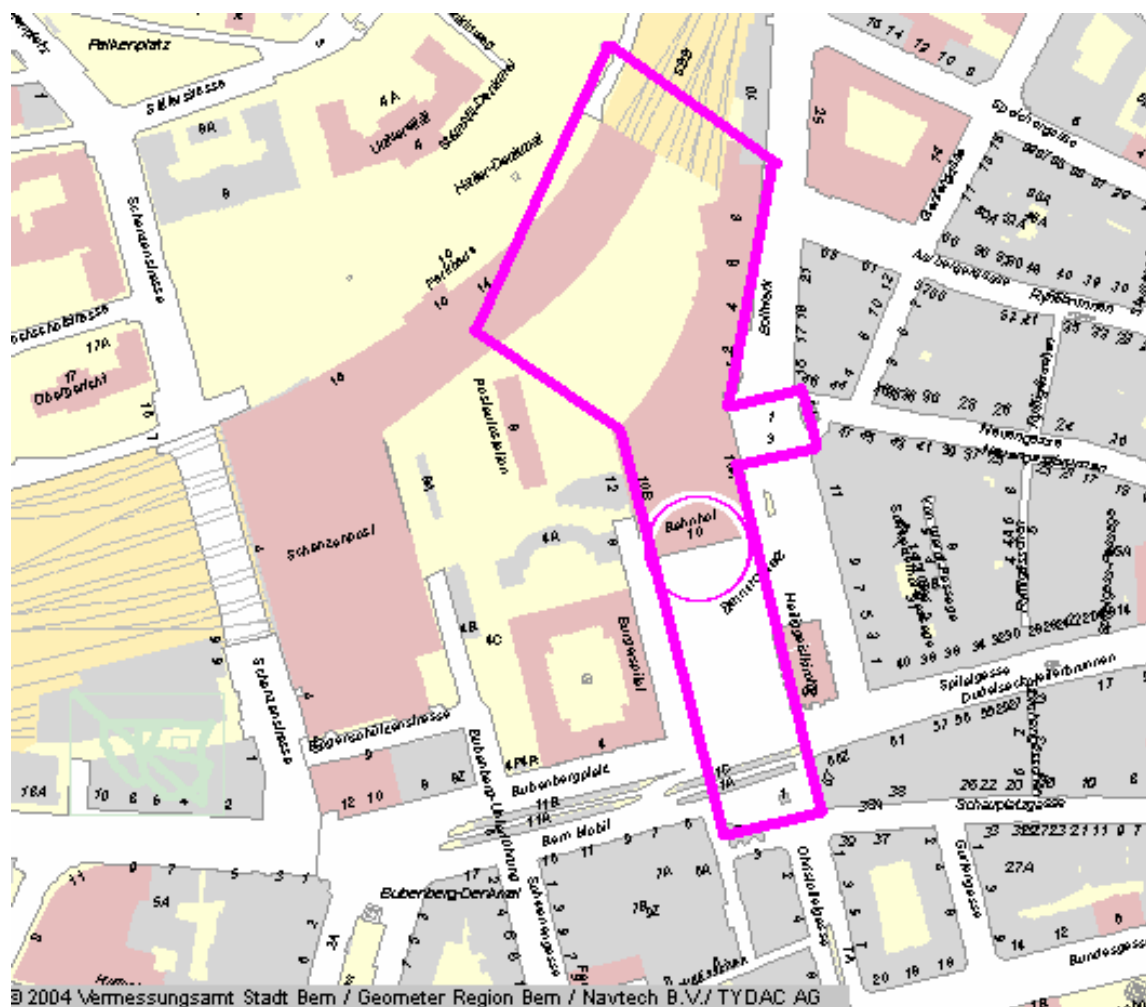


Abbildung 1: Versorgungsperimeter Kälteverbund Bahnhof Bern

Dank ausserordentlichen Effortleistungen aller Beteiligten gelang es im Frühjahr 2001, die Verzögerungen in der Projektvorbereitung infolge von technischen Unsicherheiten betreffend der Absorptionskältemaschinen durch die Zustimmung zur Contracting-Lösung aufzufangen und termingerecht die Detailplanung und die Vorbereitungsarbeiten zur Ausführung in Angriff zu nehmen.

### 3.1. Energiecontracting

Beim *Energiecontracting* sind Planer, Ersteller und Betreiber einer Anlage wirtschaftlich identisch oder zumindest partnerschaftlich organisiert. Deshalb wird mehr in rationelle Energietechnik investiert. Die daraus resultierende Ersparnis an wertvoller Endenergie leistet auch einen wichtigen Beitrag zur Verminderung von Schadstoff-Emissionen. Um einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zu erreichen, ist der *Contractor* bemüht, bereits bei der Planung das energieoptimalste System einzusetzen. Dabei sind für ihn die Systemwahl, die Art der Einbindung und die zum Einsatz gelangenden Produkte für einen optimalen Betrieb massgebend. Der Auftraggeber hat bei *Contractinglösungen* somit eine gesteigerte Gewissheit, dass er die Energie aus einer bestmöglich ausgelegten Anlage zu einem konkurrenzfähigen Preis erhält.

In der Schweiz werden über eine Million industrieller, gewerblicher und privater Energieversorgungsanlagen für Heizung, Lüftung und Klima betrieben. Sanierung, Instandhaltung und Optimierung dieser Anlagen binden permanent sowohl personelle als auch finanzielle Ressourcen. *Contractoren* wie Energie Wasser Bern haben in Verbindung mit privaten Partnern das Know-how und Potential, diese sehr oft veralteten und überdimensionierten Anlagen auf den technisch neuesten Stand zu bringen und effizient zu betreiben.

Die Philosophie des *Energiecontractings* kann prinzipiell bei allen technischen Anlagen angewendet werden: Heizungen, Wärme-Kraft-Koppelungen, Fernwärme, Kälteversorgung, Erdwärme, Sonnenkollektoren, sowie in Zukunft auch Brennstoffzellen und die Wasserstofftechnologie. *Auftraggeber resp. Kunden* können Firmen aus der Industrie oder dem Dienstleistungssektor sowie Liegenschaftsverwaltungen, Pensionskassen und Wohnbaugenossenschaften aber auch private Liegenschaftsbesitzer sein. Auch für öffentliche Körperschaften wie Gemeinden, kantonale Verwaltungen und Spitäler kann diese Art der Energie- und Anlagebewirtschaftung eine finanztechnisch vorteilhafte Lösung darstellen.

### 3.2. Die Projektidee

Die vorhandenen, mit Strom angetriebenen Kältemaschinen sind teilweise veraltet und können den erhöhten Kältebedarf nicht abdecken. Die SBB haben ein externes Ingenieurbüro beauftragt abzuklären, wie diese Anforderung auf möglichst ökologische Weise erfüllt werden kann. Es standen zwei Varianten der Kälteerzeugung zur Verfügung:

- Kälteerzeugung mittels *Absorptionskältemaschinen*, angetrieben mit teilweise erneuerbarer bzw. regenerierbarer Wärme aus der Kehrrichtentsorgungsanlage der Stadt Bern
- Kälteerzeugung unter Einsatz von *Kältekompressoren*, angetrieben mit elektrischem Strom

Aufgrund einer Vergleichsrechnung des beauftragten Ingenieurs konnte belegt werden, dass die Variante *Absorptionskältemaschinen* tiefere Vollkosten pro Jahr ergibt als die konventionelle Kälteproduktion mit Kolben- oder Schraubenverdichter. Nachteilig ist die höhere Erstinvestition.

#### Wie funktioniert eine Absorptionskältemaschine:

Das Funktionsprinzip einer Absorptionskältemaschine ist relativ einfach. Bekanntlich verdampft Wasser je nach Umgebungsdruck bei höheren bzw. tieferen Temperaturen. Diese physikalische Eigenschaft wird bei einer Absorptionskältemaschine wie folgt genutzt: in der Kältemaschine herrscht ein Unterdruck (Vakuum). Dadurch verdampft das interne Wasser, welches als Kältemittel dient, bereits bei ca. 8°C. Damit Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand wechselt, muss die Verdampfungsenergie zugesetzt werden. Diese Energie wird dem ca. 12°C warmen Rücklaufwasser des Kaltwassernetzes entzogen. Dadurch kühlt sich das Wasser auf 6°C ab und wird den Kältebezügern in Form von Kaltwasser wieder zur Verfügung gestellt.



Der in der Maschine entstandene Wasserdampf muss fortlaufend absorbiert und abgesaugt werden. Da Luft aber nur eine relativ geringe Absorptionsfähigkeit zur Aufnahme des Dampfes hat, wird eine Lithiumbromid-Lösung (Salzlösung) eingesetzt, welche den Wasserdampf aufnimmt (absorbiert). Ist die Lithiumbromid-Lösung gesättigt, muss das Wasser wieder ausgeschieden werden. Das heisst, die Salzlösung wird mit dem Heisswasser der Fernwärmeversorgung erhitzt, so dass das Wasser aus der Lösung ausdampft. Der reine Wasserdampf wird über den Kühlturmkreislauf wieder abgekühlt und verflüssigt und steht dem Prozess als Wasser wieder zur Verfügung.

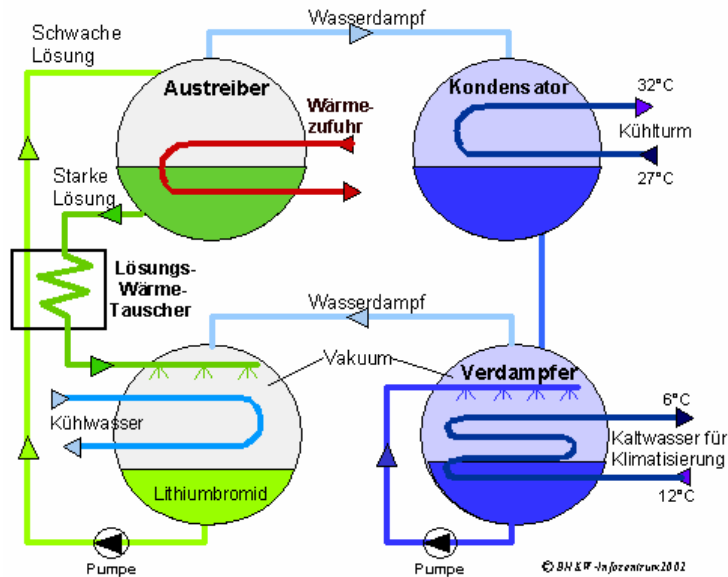


Abbildung 2: Prinzipschema Absorptionskältemaschine

Das Versorgungskonzept umfasst die in Tabelle 1 aufgeführten Liegenschaften. Der mutmassliche Endenergieverbrauch wurde anhand der einzelnen Energiestatistiken resp. der dynamischen Kühllastberechnung des planenden Ingenieurs entnommen.

Klimakälte					
Objekt	Eigentümer	Leistung (kW)	Nutzenergiebedarf (MWh/a)	Anschluss-jahr	Kreislauf-temperatur (VL / RL)
Aufnahmegebäude Ost und West	SBB	800	1 100 – 1 600	2002	Klima 6/12°C
Aufnahmegebäude Nord, Bollwerk	SBB	300	420 – 600	2007	Klima 6/12°C
Rechenzentrum ERZ 2	SBB	348	696 – 1 392	2002	Klima 6/12°C
NF Zentrum / Telefonzentrale	SBB	52	52 - 104	2002	Klima 6/12°C
Randbebauung Grosse Schanze	Grosse Schanze AG	100	100 -120	2002	Klima 6/12°C
Universität	Kanton Bern	800	1 800 – 2 200	2002	Klima 6/12°C
Christoffelunterführung	Stadt Bern	350	350 - 420	2006	Klima 6/12°C
Neuengassunterführung	Stadt Bern	85	85 - 100	2002	Klima 6/12°C

<b>Gewerbliche Kälte</b>					
<b>Objekt</b>	<b>Eigentümer</b>	<b>Rückkühl-Leistung (kW)</b>	<b>Rückkühl-Energie (m3/a)</b>		<b>Kreislauftemperatur (VL / RL)</b>
Aufnahmegebäude Ost und West	SBB	300	56 000		Rückkühlung 27/37°C
Aufnahmegebäude Nord, Bollwerk	SBB	240	46 000		Rückkühlung 27/37°C
Christoffelunterführung	Stadt Bern	120	24 000		Rückkühlung 27/37°C
Neuengassunterführung	Stadt Bern	80	16 000		Rückkühlung 27/37°C

*Tabelle 1: Gebäude im Versorgungssperimeter mit den mutmasslichen Kühlleistungen und deren Kühlenergiebedarf*

Die Tatsache, dass das Aufnahmegebäude der SBB eine Gesamtanierung erfahren sollte machte es möglich, die gesamten Haustechnikinstallationen zu erneuern. Die Beheizung und die Kühlung der Büroräumlichkeiten wurden neu über Deckenelemente gelöst, welche je nach Situation und Raumtemperatur als Kühl- oder Heizfläche dienen. Mit dieser Installation, welche übrigens die unterschiedliche Regulierung pro Raum zulässt, konnte ein separates Freecooling-System in den Kälteverbund integriert werden, welches bei Aussentemperaturen unterhalb +12 °C eine direkte Abwärmeabführung über die Hybridkühler ermöglicht.

Von den Auftraggebern SBB und Stadt Bern wurde zudem gewünscht, dass die kommerziell genutzten Mietflächen mit einem zusätzlichen Rohrleitungssystem zur Abführung der Abwärme aus gewerblichen Kühlanlagen erschlossen werden. Diesem Bedürfnis wurde mit einem Rückkühlnetz auf der Temperaturbasis 27 / 37°C entsprochen.

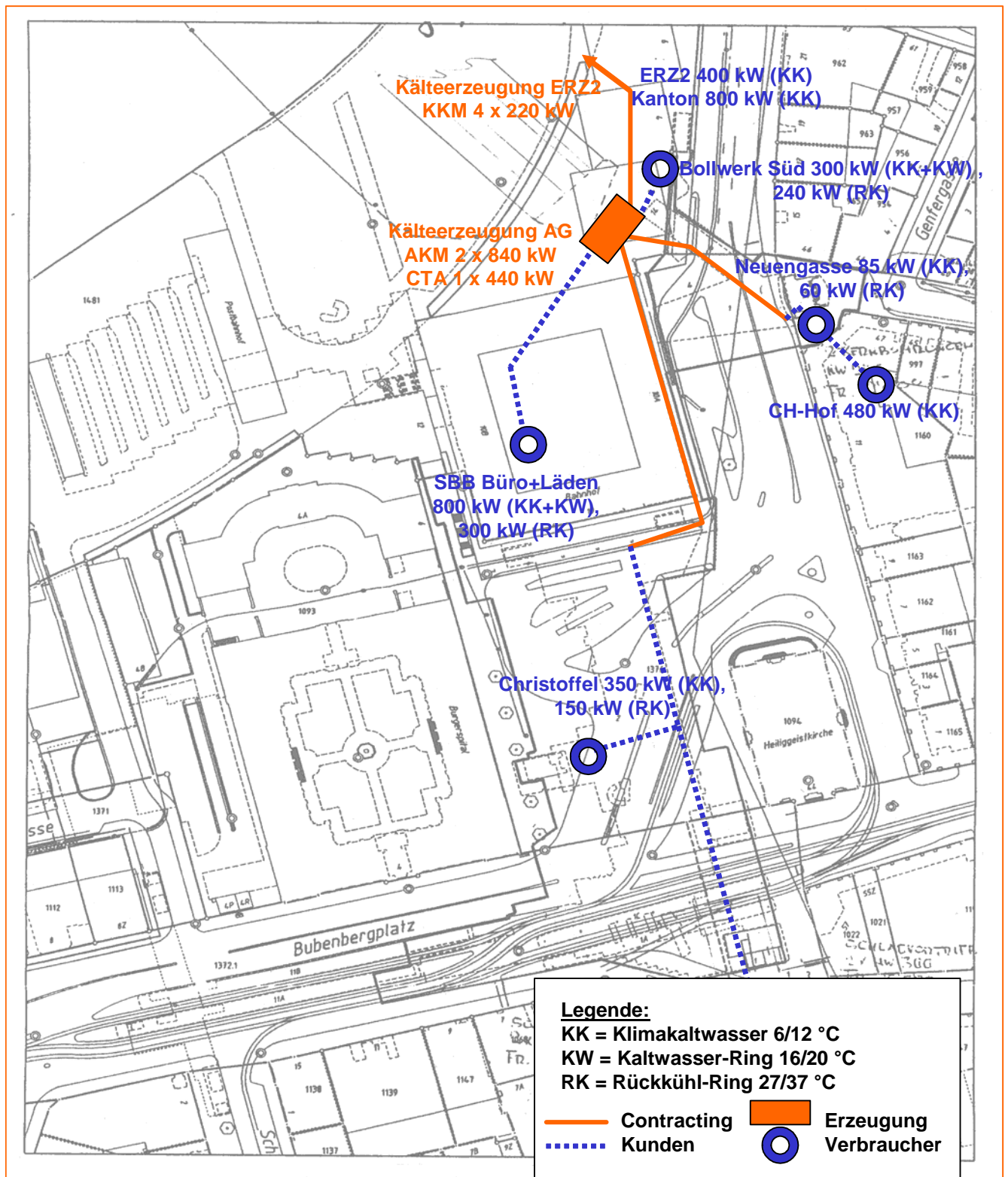


Abbildung 3: Übersichtsplan Kälteversorgung

## 4. Ausgeführtes Projekt

### 4.1. Etappierung der Kaltwasserversorgungsanlage

Durch die unterschiedlichen Anschlusszeitpunkte der einzelnen Kältebezüger wurde der Bau des Kälteverbunds etappenweise ausgeführt. Tabelle 2 veranschaulicht die verschiedenen Bauabschnitte:

Juni 2001	Entscheid der Bauherrschaften SBB, Kanton Bern und Stadt Bern zum Projekt Kaltwasserverbundanlage mit Absorptionskältemaschinen und zur Auftragserteilung an den Energiecontractor Energie Wasser Bern.
September 1996	Baubeginn: Demontage bestehende Kälteinstallationen Aufnahmegebäude SBB
Dezember 2001	Lieferung der Absorptionskältemaschinen und der Hybridkühler
April 2002	Inbetriebnahme der Kälteproduktionsanlage für die erste Etappe Aufnahmegebäude SBB
Mai 2002	Bau der Fernkälteleitung zum Rechenzentrum SBB RZ2, zur Universität und zur Unterstation Neuengassunterführung
Juni 2002	Anschluss und Inbetriebnahme Kältelieferung Grosse Schanze AG
Juli 2002	Inbetriebnahme der Kältelieferung Neuengassunterführung
August 2002	Inbetriebnahme der Kältelieferung Rechenzentrum SBB RZ2
Januar 2003	Inbetriebnahme der Kältelieferung Universität
Juli 2003	Vorbereitung der provisorischen Anschlussleitung Christoffelgassunterführung
April 2004	Provisorische Kältelieferung Christoffelgassunterführung
April 2004	Korrektur der Installationen und Ausbau der Kälteproduktionsanlage Rechenzentrum SBB RZ2
Juli 2006	Definitiver Anschluss neue Christoffelgassunterführung
2007	Definitiver Anschluss und Inbetriebnahme Kältelieferung Bollwerk SBB

*Tabelle 2: Etappierung der Ausführung Juni 2001 bis Juli 2007*

## 4.2. Dimensionierung der Kälteproduktionsanlage

Durch die etappenweise Ausführung der Anschlüsse der Kältebezüger (vergleiche Kapitel 4.1) und der Einbindung bestehender Kältemaschinen in das Kaltwasserverbundsystem konnte die Dimensionierung der Absorptionskältemaschinen auf der Basis einer Bandlast von ca. 60% der mutmasslichen Gesamtleistung des Kälteverbundes vorgenommen werden.

Last	Gerät	Kälteleistung
Bandlast Sommer	2 Absorptionskältemaschinen	2 mal 840 kW
Bandlast Winter	1 Kolben-Kältemaschine	1 mal 440 kW
Spitzendeckung Sommer	1 Kolben-Kältemaschine	1 mal 440 kW
	4 Kolben-Kältemaschinen	4 mal 220 kW
Spitzendeckung Winter	4 Kolben-Kältemaschinen	4 mal 220 kW
Speicheranlage	2 Pufferspeicher	25'000 Liter

*Tabelle 3: Dimensionierung der Kälteerzeugung*

## 4.3. Fernleitungen

Die KaltwasserbezügerInnen werden über ein ca. 800 Meter langes Fernleitungsnetz mit der notwendigen Kälteenergie versorgt. Davon sind alleine ca. 500 Meter als Verbindungsleitung zwischen den beiden Kälteproduktionszentralen im Aufnahmegebäude SBB und im Rechenzentrum SBB RZ2 installiert. Diese Leitung, welche als Pendelleitung konzipiert wurde, unterquert die gesamten Geleiseanlagen des Bahnhofareals in einem unterirdischen Posttransporttunnel. Der Begriff Pendel- oder Rückspeiseleitung soll zum Ausdruck bringen, dass über diese Leitung, je nach Verfügbarkeit der Kältemaschinen, auch eine Rückspeisung von Kaltwasser gemäss Störfallkonzept möglich ist.

#### 4.4. Prinzipschema Kälteverbund Bahnhof Bern

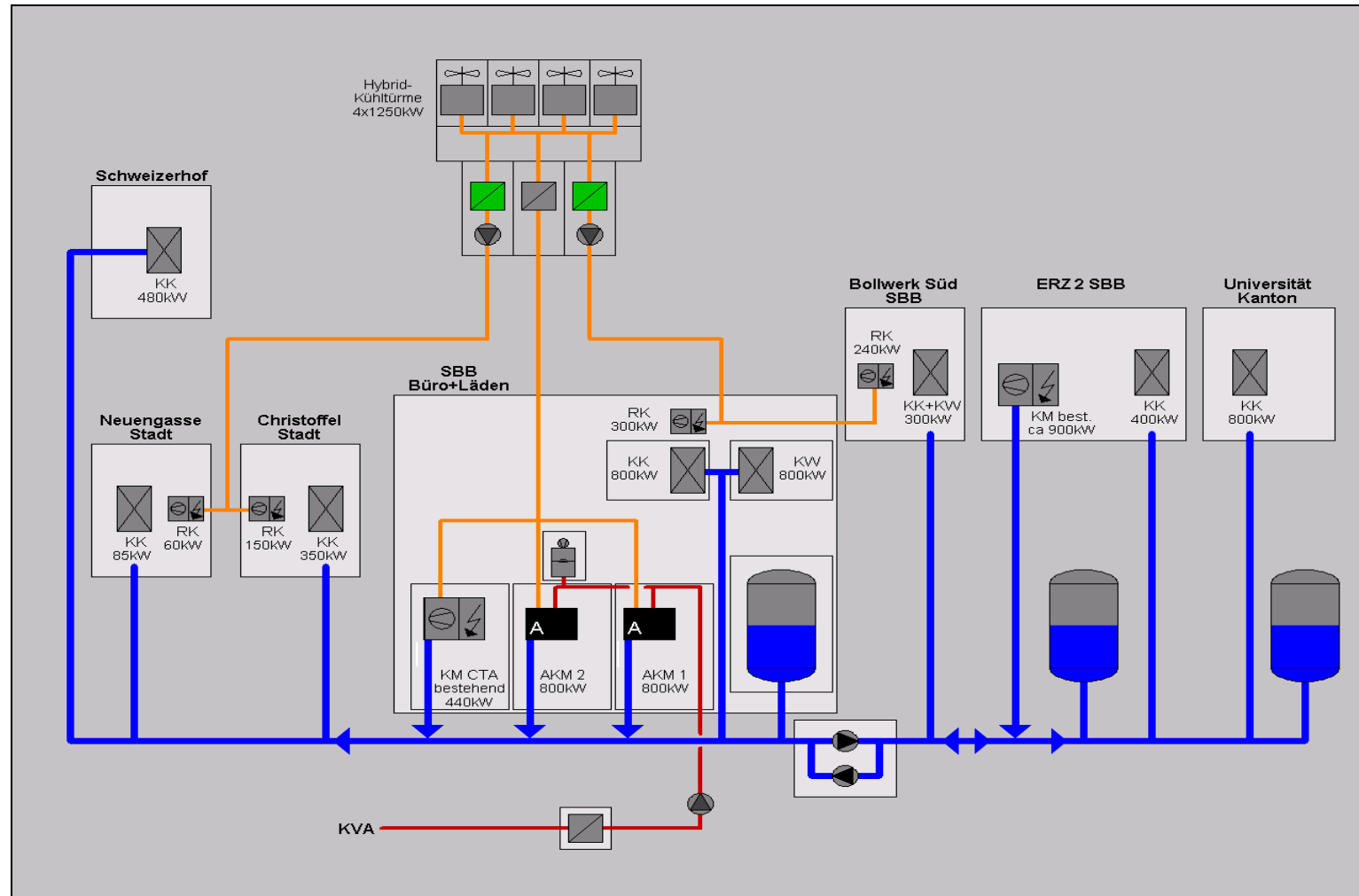


Abbildung 4: Prinzipschema des Kälteverbundes Bahnhof Bern

## 5. Betriebsergebnisse

### 5.1. Energiebilanz

Der Kälteenergiebezug durch die bereits an das Verbundsystem angeschlossenen KältebezügerInnen fiel im Jahre 2003 den Prognosen entsprechend aus. Gemäss der Anschlusssituation (vergleiche Tabelle 1) konnte für das Betrachtungsjahr 2003 mit einem maximalen theoretischen Kälteenergiebedarf von 5 516 000 kWh gerechnet werden. Der Mehrbezug von rund 454 000 kWh lässt sich mit dem ausserordentlich warmen und lang andauernden Sommer erklären.

Jahr	Vertrag maximal	2003*	2004	2005	2006
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Kälte-Energiebezug	7 522 000	6 193 289	0	0	0
Gewerbliche Kälte (Rückkühlung)		1 456 934	0	0	0

Tabelle 4: Kälte-Energiebezug 2003 bis 2006

\*Betriebsjahr 2003 von Januar bis Dezember

Die Energiebereitstellung erfolgte während den Sommermonaten mit den beiden Absorptionskältemaschinen primär zur Grundlastdeckung und zur Deckung der sich langsam verändernder Kältelasten. Zur Spitzendeckung – im Speziellen rasch ändernde Kältelasten infolge direkter Sonneneinstrahlung – wurden die Kolbenmaschinen zu- beziehungsweise abgeschaltet. Zur Sicherstellung der Versorgung mit der notwendigen Kälteenergie wurde mindestens eine Kolbenmaschine in der Kältezentrale des Rechenzentrums SBB im Dauerbetrieb eingesetzt.

Der Primärenergieeinsatz zum Betreiben der Absorptionskältemaschinen und die elektrische Antriebsenergie der Kolbenmaschinen stehen in einem günstigen Verhältnis. Die Zielsetzung, während der warmen Jahreszeit einen maximalen Anteil der Kälteproduktion mit überschüssiger Fernwärmeenergie mit den Absorptionskältemaschinen zu produzieren, konnte erreicht werden.

Primärenergieeinsatz zur Energiebereitstellung	Vertrag	2003*	2004	2005	2006
Absorptionskältemaschinen mit Fernwärme (kWh)	5 516 000	5 704 945	0	0	0
Sommerhalbjahr	-	5 042 898			
Winterhalbjahr	-	662 047			
Kolbenkältemaschinen, Rückkühlung, Pumpen mit Elektrizität (kWh)	659 000	416 369	0	0	0
Sommerhalbjahr	-	-			
Winterhalbjahr	-	-			
Freecooling Winterhalbjahr (kWh)	0	52960	0	0	0

Tabelle 5: Primärenergieeinsatz 2003 bis 2006

\*Betriebsjahr 2003 von Januar bis Dezember, Sommerhalbjahr April - September

Die detaillierten Kälteenergiebezüge gehen aus den Protokollen der Zählerablesungen und den Rechnungsstellungen hervor. Dabei wird ersichtlich, dass die relativ gute Übereinstimmung zwischen der theoretisch prognostizierten und tatsächlich bezogenen Kälteenergie, wie in Tabelle 4 dargestellt, in der mieterbezogenen Betrachtung teilweise stark auseinander klafft.

Jahr	Vertrag	2003*		2004		2005		2006	
<b>Nutzenergiebezug Klimakälte gemäss Energieverrechnung</b>			%		%		%		%
Aufnahmegebäude Ost und West (inkl. Freecooling)	1 600 000	1 495 939	93.5	0		0		0	
Aufnahmegebäude Nord, Bollwerk	600 000	474 375	79.1	0		0		0	
SBB Rechenzentrum	1 392 000	2 235 008	160.6	0		0		0	
SBB Telefonzentrale	104 000	264 068	253.9	0		0		0	
Universität Kanton Bern	2 200 000	1 553 617	70.6	0		0		0	
Stadt Bern Neuengasse	102 000	124 147	121.7	0		0		0	
Grosse Schanze	100 000	46 135	46.1	0		0		0	
Christoffelunterführung	0	0	0	0		0		0	

Jahr	Vertrag	2003*		2004		2005		2006	
<b>Nutzenergie gewerbliche Kälte (Rückkühlung)</b>		1 456 934 kWh		0		0		0	
Kühlwasser gewerbliche Kälte – Rückkühlnetz (m3)		262 495		0		0		0	
Sommerhalbjahr	-	148 278							
Winterhalbjahr	-	114 217							
Aufnahmegebäude Ost und West	56 000 m3								
Aufnahmegebäude Nord, Bollwerk	46 000 m3								
Stadt Bern Neuengasse	16 000m3	16 884							
Christoffelunterführung	23 000m3	0							

*Tabelle 6: Nutzenergiebezug 2003 bis 2006 und die Abweichungen zum Vertragswert in %*

\*Betriebsjahr 2003 von Januar bis Dezember, Sommerhalbjahr April – September

Bei der Betrachtung der Resultate *Nutzenergie gewerbliche Kälte* fällt auf, dass das gemäss theoretischer Berechnung dimensionierte Leitungsnetz zur Ableitung der Überschusswärme nicht mit einer Temperaturdifferenz von 10°C, sondern durchschnittlich nur mit 4.8°C betrieben wird. Diese Feststellung zeigt, dass der korrekte hydraulische Abgleich noch nicht optimal vorgenommen wurde und unnötig Wasser gepumpt wird.

Aus den erfassten Energieflüssen – Primär- und Nutzenergie – lässt sich der Gesamtwirkungsgrad der Kälteverbundanlage als theoretische Grösse bestimmen. Das Interesse an den Resultaten aus



dieser Betrachtung liegt jedoch eher bei der Bestimmung der Wirkungsgrade der einzelnen Aggregate. Im Unterschied zu den Kompressionskältemaschinen, wo das Verhältnis von Nutzen und Aufwand mit der Leistungszahl benannt ist, wird bei Absorptionskältemaschinen von der Wärmezahl gesprochen. Die Wärmezahl wird mit  $\zeta$  (Zeta) bezeichnet und zeigt das Verhältnis zwischen der nutzbaren Kälteleistung und der Wärmezufuhr zum Austreiber. Diese Kenngrösse ermöglicht auf einen Blick eine erste Grobbeurteilung der Funktionalität, der Einstellung und des technischen Zustandes der einzelnen Kältemaschinen.

Jahr	2003	2004	2005	2006
Gesamtwirkungsgrad Kälteproduktion exkl. Freecooling	100.3%	0%	0%	0%
Anteil Fernwärme an Nutzenregie	92.9%	0%	0%	0%
Anteil Elektrizität an Nutzenergie	6.8%	0%	0%	0%
$\zeta$ Absorptionsmaschinen exkl. Strom Rückkühler, Pumpen, etc.	0.84	0	0	0
$\varepsilon$ Kältemaschinen, exkl. Strom Rückkühler, Pumpen, etc.	3.2	0	0	0

*Tabelle 7: Zusammenstellung der Resultate, Wirkungsgrade, Produktionsanteile 2003 - 2006*

\*Betriebsjahr 2003 von Januar bis Dezember

## 5.2. Betrieb der Kälteproduktionsanlage

### 5.2.1. Absorptionskältemaschinen

Die Inbetriebnahme der beiden Absorptionsmaschinen gestaltete sich infolge des noch fehlenden resp. ungenügenden Kälteabsatzes als relativ schwierig. Erst als das Rechenzentrum der SBB angeschlossen war, konnte jede Maschine einzeln einreguliert und die Konzentration der Lithiumbromid-Lösung korrekt bestimmt werden. Die regeltechnische Einbindung der Maschinen in das Gesamtkonzept stellte hohe Anforderungen an alle Beteiligten. Im Speziellen führte der Regelkreis zur Konstanzhaltung der Kaltwasser-Vorlauftemperatur beim Erreichen des Sollwertes zu einer automatischen Reduktion der Austreiber temperatur über den internen Regelkreis der Maschinen. Durch diesen Vorgang wurde die Leistungsabgabe der Absorber kontinuierlich reduziert, so dass letztlich über den ungenügenden Ladezustand des Pufferspeichers die Kolbenmaschine zuschaltete.



Abbildung 5: Absorptionskältemaschinen Bahnhof Bern

### 5.2.2. Kolbenverdichter – Kältemaschinen

Die bestehenden Kolbenverdichtermaschinen wurden von der SBB übernommen und in das neue Verbundsystem integriert. Als Folge der Sanierungsarbeiten und der daraus resultierenden neuen Raumaufteilungen im Aufnahmegebäude musste die CTA-Maschine mit einer Kälteleistung von 440 kW vom 2. Untergeschoss in die neue Kälteproduktionszentrale im 1. Untergeschoss verschoben werden. Dieser Transport und die damit verbundenen De- und Wiedermontagearbeiten wurden genutzt, um eine Gesamtrevision – Zylinder-, Kolben- und Ventilrevision – vorzunehmen. Zudem wurde die Maschine in das neue Regulier- und Steuerkonzept integriert.



Abbildung 6: Kompressions-Kältemaschine

### 5.2.3. Kaltwasserverteilsystem und Kälteübergabestationen

Der Betrieb des Kaltwasserverteilsystems stellt bis heute keine speziellen Probleme dar. Zur Sicherstellung eines einwandfreien und energetisch optimalen Betriebs ist die Überwachung der Kaltwasserrücklauftemperaturen an der Kälteübergabestelle von entscheidender Wichtigkeit. Höhere Rücklauftemperaturen resp. kleiner werdende Temperaturdifferenzen Vor- /Rücklauf führen auf der Maschinenseite automatisch zu einer Abregulierung der Leistung und stellen für das Gesamtsystem eine ungewollte Störgrösse dar.

Zur Abgabe der abzuführenden Wärmeenergie wurden luftdurchströmte Kühltürme in V-förmiger Bauweise auf dem Flachdach des Aufnahmegebäudes aufgestellt mit einer Gesamtleistung von 5 000 kW. Ab einer Aussentemperatur von ca. 22°C werden die Kühler zur Leistungssteigerung feucht gefahren. Die Einbindung in das Rückkühlwassersystem erfolgt aus Sicherheitsgründen – Frostgefahr – über einen Wasser -/ Glykol Kreislauf und den notwendigen

Plattenwärmetauschern. Während dem Sommerhalbjahr 2003 wurde festgestellt, dass die Leistung der Plattenwärmetauscher eventuell zu gering bemessen wurde. Eine Garantiemessung der Leistung durch den Lieferanten wurde verlangt und wird in diesem Jahr durchgeführt. Bis zum Vorliegen der Resultate wurde die Garantielaufzeit sistiert.



*Abbildung 7: Hybridrückkühler auf dem Dach des Aufnahmegebäudes*

## 6. Investitionskosten und Finanzierung

Die Investitionskosten beliefen sich bis zum provisorischen Bauabschluss im Herbst 2003 auf rund Fr. 5.2 Mio. Mit knapp 20% fallen die Positionen Honorare, Bauherrenleistungen und Nebenkosten im Rahmen des bei solchen Projekten zu erwartenden an. Durch die kostenfreie Übernahme der fünf bestehenden Kältemaschinen lässt sich die Kostensituation nur ungenügend mit Kennzahlen von andern Anlagen vergleichen.

Beschreibung	Summe Fr.	Anteile %
Baumeisterarbeiten	376'000.00	7.3%
Asbestsanierung	15'000.00	0.3%
Elektroinstallatoionen	271'000.00	5.2%
Regulierung MSR	169'000.00	3.3%
Leitebene	62'000.00	1.2%
Fernübertragungssystem	7'000.00	0.1%
Schaltshrankanlagen	92'000.00	1.8%
Energiezulieferung, Kälteverrohrung	1'895'000.00	36.6%
Absorptionskältemaschinen	325'000.00	6.3%
Rückkühler	632'000.00	12.2%
Rohrleitungsisolationen	295'000.00	5.7%
Sanitärinstallationen	17'000.00	0.3%
Honorare	890'000.00	17.2%
Diverse Leistungen	57'000.00	1.1%
Bauherrenleistungen	70'000.00	1.4%
<b>Total Investitionskosten</b>	<b>5'173'000</b>	<b>100.0%</b>

Tabelle 8 : Investitionskosten

Finanziert wurde der Kälteverbund Bahnhof Bern durch Energie Wasser Bern als Energiecontracting-Projekt. Durch den speziellen Charakter der Anlage und im Speziellen wegen der Absorptionskältemaschinen wurde das Projekt im Rahmen einer Pilot- und Demonstrationsanlage durch das Bundesamt für Energie finanziell unterstützt.

Finanzierung	Summe Fr.	Anteile
Förderbeitrag Bundesamt für Energie	240'000	4.6%
Anteil Energie Wasser Bern	4'933'000	95.4%
<b>Total Finanzierung</b>	<b>5'173'000</b>	<b>100.0%</b>

Tabelle 9: Finanzierung

## 7. Verrechnungsbasis

Vor dem Baubeginn des Kälteverbundes wurde die Verrechnungsbasis vertraglich festgelegt. Diese ging aus der Contracting-Offerte von Energie Wasser Bern hervor und gliedert sich wie folgt:

### **Preis für Klimakälte:**

**Leistungspreis:** Der Leistungspreis setzt sich aus den Komponenten Kapitalzins, Amortisation, Versicherungen, Instandhaltung und Instandsetzung zusammen. Als Investition werden die für die Erstellung der Installationen notwendigen finanziellen Mittel der Berechnung zu Grunde gelegt. Der Zinssatz zur Berechnung der Jahreskosten wird indexiert nach dem Kassazinssatz der Bundesobligationen.

Leistungspreis bei Vertragsabschluss: Fr. 210.00 / kW

**Arbeitspreis:** Der Arbeitspreis stellt die Basis zur Verrechnung der bezogenen Nutzenergie dar. Er repräsentiert den Primärenergieeinsatz – Fernwärmeenergie, Strom, Wasser – und allenfalls variable, in Abhängigkeit der Anlagelaufzeit anfallende Betriebsnebenkosten.

Arbeitspreis bei Vertragsabschluss: Fr. 34.10 /MWh

### **Preis für gewerbliche Kälte:**

**Leistungspreis:** Der Leistungspreis wird analog dem Leistungspreis für Klimakälte berechnet.

Leistungspreis bei Vertragsabschluss: Fr. 56.00 / kW

**Arbeitspreis:** Zur Vereinfachung der Situation wird für das Abführen der Abwärme bei gewerblichen Kälteaggregaten nur die bezogene Wassermenge in Rechnung gestellt. Dieser reduzierte Ansatz kann durchaus angewendet werden, falls der periodischen Kontrolle der konstanten Temperaturdifferenz genügend Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Arbeitspreis bei Vertragsabschluss: Fr. 0.25 /m<sup>3</sup>

## 8. Organisation/Betriebsüberwachung/Betriebssicherheit

Trägerschaft des Kälteverbundes Bahnhof Bern ist Energie Wasser Bern. Im Auftrag der Bauherrschaften SBB, Kanton Bern und Stadt Bern wurde die Anlage realisiert. Gemäss Vertrag zeichnet Energie Wasser Bern auch für die Betriebsführung, die Instandhaltung und die Instandsetzung verantwortlich.

Die Betriebsführung wird durch das Personal der Betriebsgruppe der Fernwärmeversorgung der Stadt Bern sichergestellt. Mittels Prozessleitsystem können Eingriffe bei Störungen oder für Optimierungen via Fernüberwachung und –zugriff vorgenommen werden.

Betriebs- und Versorgungssicherheit sind die wichtigsten Elemente beim Betrieb eines Kälteverbundes. Aus diesem Grunde wurde mit den beteiligten Bauherrschaften und KältebezügerInnen die Versorgungssensibilität analysiert und entsprechende Abschaltszenarien in einem Störfallkonzept festgehalten.