建筑技术的革命

- 保温隔热
- 新型的日光与保温玻璃技术
- 作为一体和分体建筑部件的蓄热装置

保温隔热

赫尔穆特 • 魏因拉德博士（Dr. Helmut Weinläder）
巴伐利亚应用能源研究中心
weinlaeder@zae.uni-wuerzburg.de

汉斯 • 埃尔霍恩（Hans Erhorn）
弗劳恩霍夫建筑物理研究所
hans.erhorn@ibp.fraunhofer.de

迪特里希 • 施密特博士（Dr. Dietrich Schmidt）
弗劳恩霍夫建筑物理研究所
dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

维尔纳 • 普拉策（Werner Platzer）
弗劳恩霍夫太阳能研究所
werner.platzer@ise.fraunhofer.de

彼得 • 尼茨博士（Dr. Peter Nitz）
弗劳恩霍夫太阳能研究所
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

引言

居住建筑所采取的能效措施主要目的是减少建筑物围护结构的传热损失。除了更多地使用传统的保温材料外，新型材料和部件 — 如真空保温系统 — 可以提供能效水平更高的解决方案，尤其是考虑到保温所需空间的情况下，这些方案还可以提供新的外形设计和技术可能性。此外，高能效的窗户、玻璃以及太阳能透明保温层 还可以利用被动太阳得热，成为房间采暖的辅助手段。

传统的保温材料

目前，保温材料市场上主要是两类产品：

1. 矿物保温材料 （市场占有率 55 ）
2. 有机泡沫（41%），其中还可分为：

– EPS 硬泡聚苯板保温材料（30%）
– XPS 挤塑聚苯板保温材料 （6 %）
– PUR 硬泡聚氨酯保温材料（5 %）（2005 年时的市场状况 [1]）。

其他种类的保温材料，如珍珠岩、玻化微珠或用可再生原料生产的保温材料，合起来只占大约 4% 的市场份额。导热系数是一个与温度有关的材料常数，其计量单位是 W/(m^{2}K)。这个值越小，说明保温性能越好。常规保温材料的导热系数一般在 0.035 到 0.040 W/(m^{2}K) 之间，而聚氨酯保温材料的导热系数大约是 0.030 W/(m^{2}K)。目前市场上新出现了一种酚醛树脂硬泡保温材料，自称导热系数只有 0.022 W/(m^{2}K)。

热传导原理—改进和优化手段

概言之，热传导就是因热梯度而引起的能量传导过程，其传递原理各不相同，其中包括：

- 通过空气对流引起的热传递
- 热传导
- 红外射线传递

抑制空气对流是每种保温材料最基本的任务。由于静止空气的导热性与固体相比要低得多，因此大多数保温材料都是多孔的。这样一来，保温材料的密度也会降低。密度越低，固体传热占总传热量的比例越小。但是，密度越低，辐射传热量就越多，材料机械稳定性总体上会下降，因此从总体优化的角度来看，在减少材料投入方面应当适可而止。所以，在建筑行业目前所使用的传统保温材料中，总体传热性能的好坏主要看其孔隙中所填充气体的导热性如何（气体导热所占比例大于 60%）。保温性能的改进主要依靠降低气体导热性来实现。因此，如果要想让聚氨酯保温材料的保温效果更佳，就要在其密闭孔隙内填充其他类型的导热性更低的气体。然而，在实际使用中设定保温值时，要考虑到孔隙是不可能绝对密封的，这样就会造成孔隙内的气体与周围的空气产生交换，从而导致保温值变差。如果保温材料能使用防扩散的罩面层，就可以大大削弱这种不良后果。

1 透明保温层如今大多被称为太阳能外墙。

图 1
对慕尼黑一栋联排别墅中一座房屋的改造，建筑师：F. 里希特布劳（Lichtblau）（2001 年）；真空保温板，保温层总厚度 9cm，k 值 =0.15W/(m²K)

资料来源：巴伐利亚应用能源研究中心（ZAE）

如欲改进聚苯板的保温性能，就需从红外辐射传递着手。如果采用特种红外遮光剂，便可以提高保温性能，或是在相同导热性下，减少一半的材料使用量。

纳米材料

当孔径小于 1 微米时，通过气体分子的热传导不会受到其他气体分子的阻碍，而是越来越多地会穿过那些拥有大量气泡壁或其他结构的最小孔隙。如果一种保温材料的总体密度足够低，那么从整个热传导过程来看，静止空气的导热系数就会低于约 0.026W/(m²K) 这个“魔力”阈值。热解硅酸（即以高温工艺生产出来的硅酸）粉末压块或由化工湿法工艺生产出来的硅气凝胶粉末压块的导热系数约为 0.018W/(m²K)，只有传统的、填充空气的保温材料的一半。和这类氧化硅基材料相比，纳米级结构的有机泡沫具有更多的改进潜力。

真空保温板（VIP）

真空保温板是指由一个真空外包装和填充材料构成的保温组件。比如说一个保温瓶（众所周知，其高效的保温性能来自真空），它的圆柱状外罩可以承受 1bar 的外部大气压力（这相当于每平方米承受 10 吨的重量），而扁平的真空保温板中的抗压填充材料或结构也需要承受相应的压力。尤其是如果采用热解硅酸基（SiO_2）的纳米结构填充材料，同时对真空质量要求很低，结合使用当今市场上密封效果最好的高阻隔塑料层压板，这样生产出来的真空保温板的使用寿命可以长达数十年，而这也正是建筑行业的要求。与非真空保温材料相比，在厚度相同的情况下，真空保温板板芯的保温效果要高 5 到 10 倍。这样一来，人们就可以针对新建建筑的不同用途，采用更薄、更节省空间、高效的保温结构，此外也可以使用在既有建筑改造措施上。不过，真空保温板的边缘部分容易出现热桥，同时这种板材容易受损，不能进行现场切割，这些都是存在的问题。因此，有一种以真空保温板为基础的外墙外保温系统，即 Lockplate®（麦克斯特德国有限责任公司），它可以将热桥减少到最低，同时便于施工安装。由于只有少数几种标准尺寸，因此便于进行成本低廉的自动化批量生产。

图 2
位于布格贝格（Burgberg）的一栋新建单户房屋（2007 年）；采用了带有真空保温板的外墙外保温系统，保温层总厚度为 9cm，k 值 =0.14W/(m²K)

资料来源：弗劳恩霍夫太阳能研究所

窗框型材

即便是保温效果良好的建筑物，在窗户区域依然存在热工薄弱环节。典型的被动式房屋窗框型材的 U_f 值 [2] 能达到 0.8W/(m²K)，但窗框的安装深度会达到 120mm 甚至更多。目前，有关方面正在研究开发安装深度只有 90mm、U_f 值为 0.7W/(m²) 的新型窗框型材。

2 U 为传热系数，下标 f 代表窗框

图 3
Ug 值为 0.5W/(m²K) 的真空保温玻璃（样品）

资料来源：巴伐利亚 ZAE

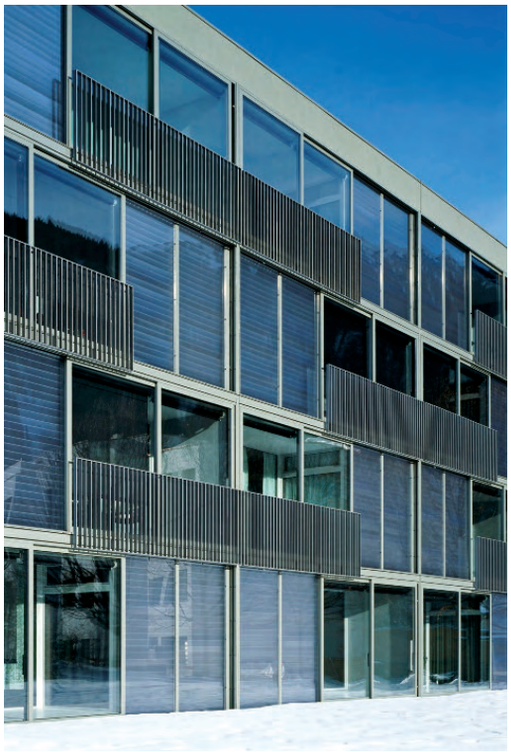


图 4
位于埃姆斯市多马特镇的老年公寓项目，安装了厚度 20mm 的 GlassXcrystal 太阳能外墙系统

窗户

如果将热工性能极高的窗框和 Ug 值[3] 为 0.7W/(m² K) 的三层玻璃结合起来，那么窗户的 Uw 值[4] 便可以达到 0.8W/(m²K)。这样一来，虽然窗户的传热系数仍然明显高于保温良好的不透明墙体（譬如 0.15W/(m²K)）；但是，如果考虑到太阳辐射，那么南立面上的窗户不仅能够弥补它们的热损失，而且还能有效地获得太阳得热。而在背阳的北立面，不透明的墙体上依然主要采用传统类型的窗户。

真空保温玻璃（VIG）

与不透明的真空保温板相类似的是，如果对两层玻璃中间抽真空，也可以大大提高保温效果（2 倍）。技术方面的挑战在于研发出能够承受得住外部气压的支架。此外还必须研发出足够密封的、但同时热工性能稳定的封边。两个组件都不应该对整体热传导产生重大影响。当总厚度只有 9mm、重量与双层玻璃相同时，Ug 值可以达到 0.5W/(m²K)。由于只有一层 low-e[5] 玻璃，真空保温玻璃在高得热率的情况下也能表现出极佳的透光率。即使在北立面，真空保温玻璃也能实现能量平衡，即太阳得热和散热损失在整个采暖期内都是相等的。

透明保温系统

透明保温系统所使用的保温材料具有高透光率（半透明）的特点。人们尤为关注的是，在不同的用途下，或是当总能量透过率 g[6] 较低时，能够获得无眩目的光线（将太阳能外墙作为日光系统），或是当总能量透过率 g 较高时，可以利用太阳辐射热（将太阳能外墙作为太阳能墙壁采暖系统）。这种拥有毛细管或蜂窝结构的材料的导热性要比传统保温材料高 2 到 2.5 倍。如果使用纳米结构的颗粒状硅气凝胶，导热系数会明显降低，低至约 0.025W/(m²K)。而太阳能外墙壁采暖系统在采暖期内的得热要明显高于热损失。在实际应用中，要注意在夏季采取防护措施，避免室内出现过热现象。

3 U 为传热系数，下标 g 代表玻璃
4 U 为传热系数，下标 w 代表窗户
5 e 代表辐射率
6 g 值反映的是总能量透射率，即会有多少热量透过一个建筑构件。

当前的发展趋势是采用具有抑制对流和高 g 值的高效保温玻璃。（TIGI Ltd.，以色列 [2]），另一种产品是将季节性棱镜遮阳系统和一体化潜热蓄热装置组合起来（GlassX AG，苏黎世 [3]）。这样，Ug 值便可以低于 0.5W/(m²K)。另一种新型技术是将季节性棱镜遮阳装置组合在一种经过专门优化的多层板中（Produwa GmbH，多特蒙德 [4]）。目的是研制出一种价格极为低廉的简单系统。

可调保温层（SWD）

另一种防止过热的方法是采用可调保温层。其原理是在真空保温板外面加装不锈钢外罩，里面是颗粒较粗的填充材料（玻璃纤维）。此外还往真空保温板里加入了一种内含金属氢化物吸气剂（具有氢气储存功能）的可加热膜盒。如果吸气剂受热，便会释放出少量的导热性能很好的氢气，由此将构件的导热性提高 100 倍。这样就使高保温构件变成了高效导热构件。而整个过程是可逆的：如果让吸气剂膜盒冷却下来，吸气剂会重新吸收氢气。当缺少太阳辐射时，或是在夏季房间内过热时，真空保温板处于惰性和高保温状态。只有在采暖期内，当同时存在供热需求和太阳辐射时，才会打开加热系统，提高传热系数，使热量传递到建筑物内部，而这一过程所需要的电能仅有 5W/m²。

图 5
潜热蓄热装置和季节性遮阳棱镜系统，Ug 值为 0.48W/(m²K)。建筑师 D. 施瓦茨（Schwarz），多马特 / 埃姆斯，2004 年

资料来源：弗劳恩霍夫 ISE 研究所

参考文献

[1] GDI 保温材料工业协会，www.gdi-daemmstoffe.de，privat communication

[2] Tigi Ltd. 公司。在以色列还没有网站，刚创立不久，尚未生产出产品

[3] www.glassx.ch

[4] www.prokulit.de

新型的日光与保温玻璃技术

彼得 • 尼茨博士（Dr. Peter Nitz）
弗劳恩霍夫 ISE 研究所
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

斐德里克 • 吉奥凡内蒂（Federico Giovannetti）
ISFH
f.giovanetti@isfh.de

赫尔穆特 • 魏因拉德博士（Dr. Helmut Weinläder）
巴伐利亚应用能源研究中心
weinlaeder@zae.uni-wuerzburg.de

延 • 维诺尔德（Jan Wienold）
弗劳恩霍夫 ISE 研究所
j.wienold@ise.fraunhofer.de

导言

如今，建筑设计师经常采用透明度很高的外立面，从而将日光利用纳入设计规划中。只有因地制宜地充分利用日光照射，才能满足人们对能效、热舒适度和室内良好视线的高要求。而新型的微结构组件，譬如棱镜导光组件，可以根据太阳的位置，有针对性地引导或反射照进房间的日光。如果玻璃窗上安装了这种结构的导光组件，那么便可以将太阳光引导到建筑物内很深的区域，或是作为固定安装的遮阳装置，在某些月份发挥有效的遮阳作用，并根据不同的季节，改善建筑物的夏季隔热。如今，人们一直在努力将这类结构做得越来越小，以便节省材料、重量和成本，避免吸收阳光，同时让其整体外观显得平整、一致，并使导光组件更容易整合到窗户系统之中。

目前，在弗劳恩霍夫太阳能研究所（Fraunhofer ISE）和 ISFH 太阳能研究所的科研人员正在研究如何在玻璃窗系统中使用微结构组件，以达到季节性遮阳的目的，并对日光进行引导。为此，人们研发出了相关的导光组件或季节性固定遮阳系统，并实现了生产和优化。目前，我们正在同工业界的伙伴开展合作，试图将这些新创意、新设想转化成产品。

工作原理及用途

微型结构的导光组件可以有针对性地对射入的阳光进行导向或反射。利用微型结构组件进行导光或反射，其原理是光线在这些结构中会发生折射，或在内部发生全反射。在一年的不同时间里，对遮阳和光利用率的要求是不同的。由于光线在不同角度下的传热率不同，同时太阳高度也随着季节而变化，因此，这些装有固定遮阳装置的导光结构可以在不同季节拥有不同的传热性能：不断变换的太阳高度起到了按季节进行调节的作用：在冬天，太阳光的照射角度较低，当太阳位于天空最高点时，明亮的日光会被传导进来，而在夏天，太阳位置较高，阳光会被反射回去。

当采用微型结构改进对日光的利用时，光线经过传导后，方向会发生变化，从而能够到达室内较深的地方，使即便是远离窗户的区域也能有足够的日光照射到。由于同时还需避免室内的人员被阳光晃到眼睛，因此，这种结构还可以使光线在入射角度较平时，被向上引导到可反射光线的浅色天花板上。除了上述介绍的玻璃研发新技术之外，弗劳恩霍夫太阳能研究所还研发出用来评估视觉舒适性的方法。其中包括是否可以避免眩目，日光是否会降低电脑屏幕的分辨率，朝窗外看的视线是否良好，以及一天当中日光会对外立面系统的颜色产生哪些影响等。他们开发出一种新型的日光眩目检测方法，并对其进行了认证[4]。这种“日光防眩可能性检测”（DGP）程序可以让我们了解产生眩目干扰的概率有多大。

由于在一般情况下，人的视线无法或很难穿过棱镜（微型）结构构件，因此这种结构适合用在视线并非必须良好的领域，包括天窗、操作间和通道等地方的玻璃窗，以及那些只有部分面积安装这种结构、而中间部位仍为透明玻璃的区域。这种构件尤其适合用在半透明或不透明外墙部件的内部或前方，譬如用在不透明墙体前面的透明保温层（TWD）组件中，这种组件在冬天有利于房间采暖，同时具有季节性遮阳功能，可以避免室内温度在夏季过高。

有多种方法可以将这种构件整合到技术先进的保温玻璃之中。比如，可以将一张微结构薄膜作为独立的“第三层”，紧绷在双层保温玻璃的中间（图 1b）[1]。它在热工性能方面有许多优点，U_g 值最低可达 0.6W/(m^2k)，可以和三层保温玻璃媲美。缺点是：由于界面增加了，导致导热性在冬季略有下降。还有一种选择是将微结构薄膜单面层压在玻璃上（图 1c）[2]，这种方法的热工性能相当于双层保温玻璃，而冬季的导热性则要略高一些。

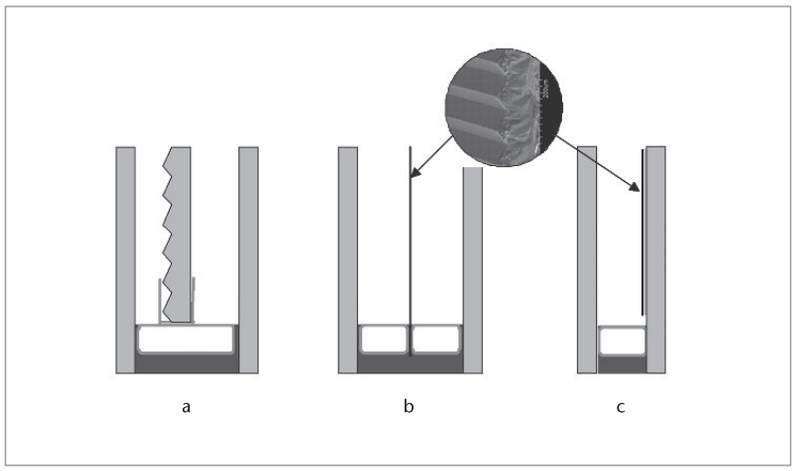


图 1
玻璃中的微结构薄膜：
a) 玻璃中的低倍放大棱镜板（最新技术）
b) 独立安置的带导光微结构的薄膜
c) 层压在玻璃上的微结构薄膜

资料来源：ISFH 和弗劳恩霍夫太阳能研究所

微结构是如何产生的

弗劳恩霍夫太阳能研究所采用干涉光刻技术来生产用于遮阳、导光及其他用途的微结构。这种技术是采用激光干涉图对光敏漆（光刻胶）进行曝光，然后用这种光刻胶生产出压膜工具，由此可以逐步降低微型复刻技术生产大面积微结构时的复刻成本。

除了使用干涉光刻技术来生产原型之外，人们还对采用超精细加工技术（譬如钻石车削或铣削技术）所生产出来的微结构进行了研究。结果发现，超精细工艺可以直接在压辊上进行切割，这样可以生产出无接缝的连续薄膜卷筒。

上述两种工艺所生产出的微结构都可以经过调制，具备附加的光散射功能。通过光散射，会减少可能出现的色效应（白色光在经过棱镜的折射后会形成光谱色），这样便可以降低光线亮度，从而避免产生眩目现象。

为了获得这些效果，在 ISFH（太阳能研究所），人们正在研究是否可以将未经调制的微结构与散光玻璃组合起来。他们采用了多种生产方法以及光散射组合方式，对其进行了测试，可以结合具体要求来应用。

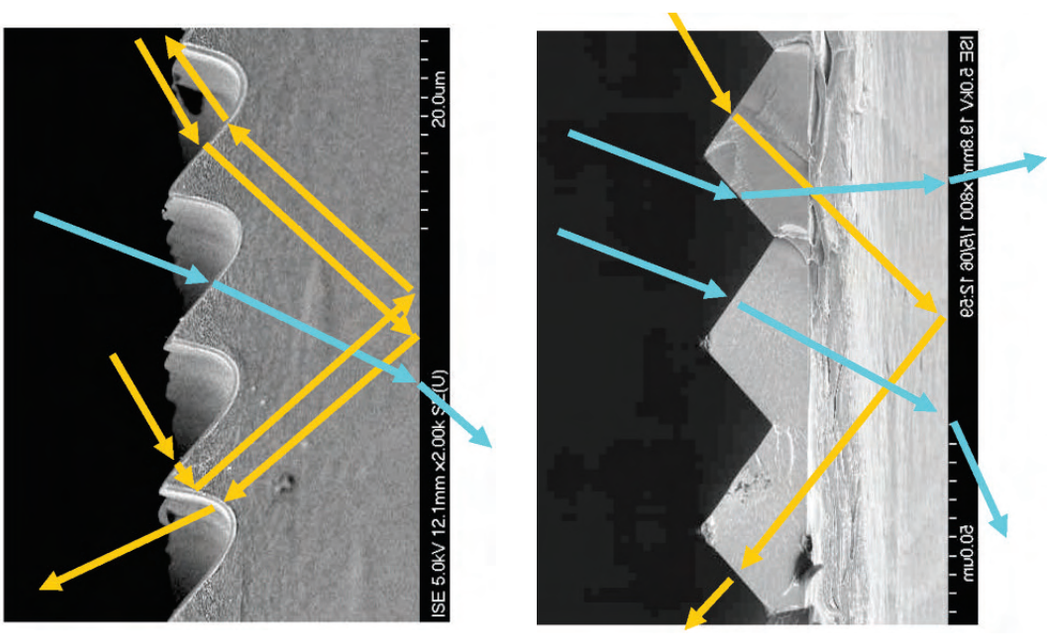


图 2
扫描电子显微镜下的具有季节性遮阳功能的棱镜结构。
左图为采用干涉光刻技术生产出来的微结构，其表面经过调制后可以实现光散射，从图上可以看出，棱镜高度经过了调制。图中的箭头为光线在夏季（黄色）和冬季（蓝色）的走向。
右图为采用微型机械技术生产出来的微结构，根据旁边的刻度表进行调制。由于刻度表要比结构周期大很多，因此在图中看不到调制的结果。

微结构举例及其特点

下述几种微结构类型只是我们从目前玻璃窗所采用的多种类型中挑选出来的。原则上看，它们全都是线性棱镜结构。图 2 中介绍了两种结构类型，并用图形的方式展示了其功能。两种结构的生产工艺虽然不同，但经过调制后，都具有散射光的功能。

图 3 介绍了在一件玻璃样品上所测量到的光与太阳辐射的透射率。根据具体的结构参数以及与玻璃的整合方式，在一定入射角度下的透射率或 g 值以及在不同季节中遮阳功能的“关闭”效果可能会比图 3 中显示的还要强 [1]。当加入 low-e 层后，太阳辐射的透射率要明显低于可见光的透射率。

图 2 中的微结构被用于立式玻璃窗上。而对于屋面玻璃之类的地方，作为固定的季节性遮阳装置，则适合采用能将近乎垂直照射在结构上的光线反射出去的微结构。如想详细了解不同的微结构系统适合用于哪些玻璃上，请见参考文献 [2]。还有一些具有导光功能的微结构会将光线转向上方引导，最适合用于阳光入射角度大的情况，其光透射率要高于没有导光结构的标准玻璃 [3]。

在对棱镜结构进行微型化的过程中，除了结构界面之间会有反射外，还会产生衍射效果，这会减弱或者消除原先期望产生的功能，并会导致产生重像和色效应。这种现象可以通过波动光学模拟预测出来，并确定其数值。结果显示，当数值（结构周期）在 50-100 μ m 之间时，棱镜结构的衍射效应实际上可以小到忽略不计。图 1b 和 1c 中介绍的两种工艺都可以生产大面积玻璃样品，图中展示了它们各自的特点。初步的稳定性检测的结果带给我们很大的信心。但目前我们仍需进行更多的检测和优化，之后才能和我们的工业企业伙伴一道，将研发工作成果转化成可靠的产品。

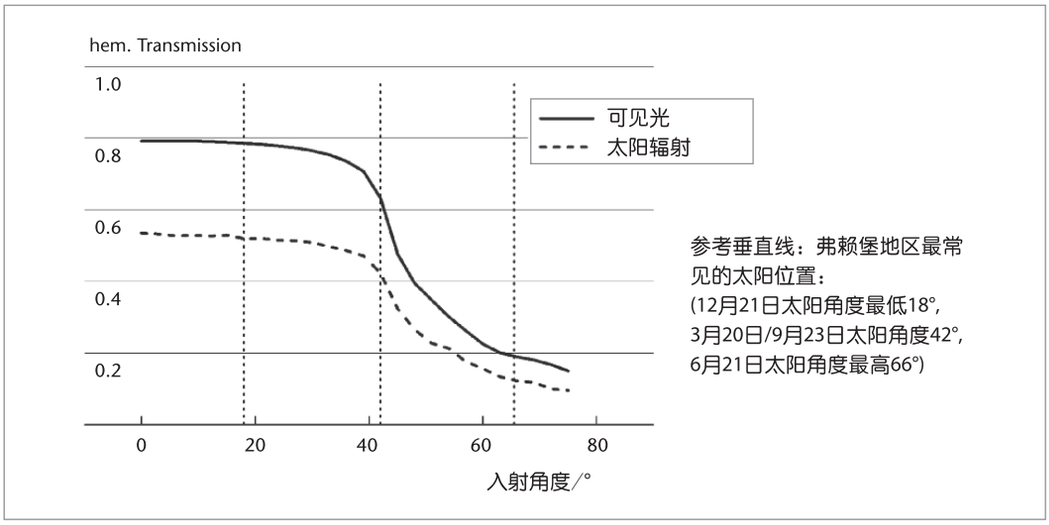
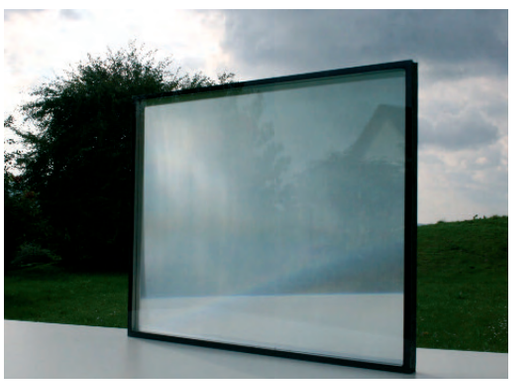


图 3
在不同的太阳入射角度下，一个集成遮阳结构（如图 2 右侧的结构）的双层保温玻璃的太阳辐射透射率和可见光透射率。

资料来源：弗劳恩霍夫太阳能研究所



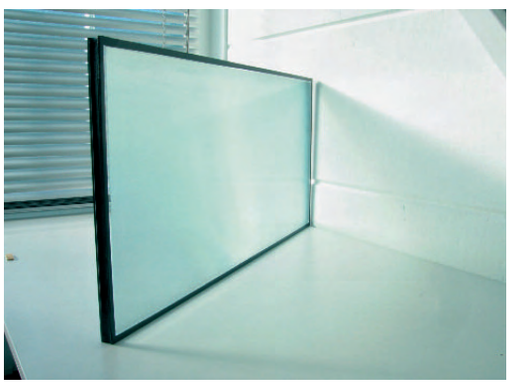


图 4
带有季节性遮阳功能的微结构薄膜的大面积保温玻璃样品：
左侧：用在透明保温层组件前方的薄膜，尺寸 850x700mm² (ISFH)
右侧：用在天窗区域的带有光散射功能的层压薄膜，尺寸 1000x500mm²

资料来源：弗劳恩霍夫太阳能研究所

本文中所介绍的研发工作得到了联邦经济部（BMWi，项目编号 0327312）和德国联邦环境基金会（DBU，项目编号 24673）的资助。

参考文献

[1] F. 吉奥凡内蒂（Giovannetti），Karl H.C. 费舍尔（Fischer）：“如何在玻璃中整合微结构导光系统”，第二届能效和既有建筑国际应用者论坛大会文集，Staffelstein，2008.2.14/15

[2] P. 尼茨（Nitz），A. 龚贝特（Gombert），B. 布莱西（Bläsi），A. 格奥尔格（Georg），J. 米克（Mick），Ch. 布勒（Bühler），G. 瓦尔策（Walze），W. 霍斯菲尔特（Hossfeld）：“利用微结构表面进行遮阳和导光”，第 9 届建筑物创新光技术专题学术讨论会大会文集，Staffelstein，2003.1.23/23，第 103-108 页。

[3] P. 尼茨（Nitz），B. 布莱西（Bläsi），J. 米克（Mick），G. 瓦尔策（Walze），A. 龚贝特（Gombert）：“采用微结构光功能组件的玻璃”，第 13 届光与建筑设计专题学术讨论会大会文集，Staffelstein，2007.2.8/9，第 20-25 页。

[4] J. 维诺尔德（Wienold），J. 克里斯托弗森（Christoffersen）：“在日光环境下使用 CCD 相机对新型防眩目模型进行评估的方法及其发展”，《能源与建筑》38，7（2006），743-757

建筑一体化和分体式蓄热装置

约亨 • 马纳拉博士（Dr. Jochen Manara）
巴伐利亚应用能源研究中心
manara@zae.uni-wuerzburg.de

彼得 • 邵斯希（Peter Schossig）
弗劳恩霍夫 ISE 研究所
schossig@ise.fraunhofer.de

哈拉特 • 德吕克博士（Dr. Harald Drück）
斯图加特大学热动力和热技术研究所（ITW）
drueck@itw.uni-stuttgart.de

亨纳 • 科斯克斯（Henner Kerskes）
斯图加特大学热动力和热技术研究所（ITW）
kerskes@itw.uni-stuttgart.de

约瑟夫 • 耶尼（Josef Jenni）
耶尼能源技术股份公司
jennienergietechnik@livenet.ch

蓄热和蓄冷

在设计现代化的办公和住宅建筑时，室内空调系统是一个非常重要的环节，因为在采暖与制冷方面存在很高的节能潜力。除了对保温系统进行优化外，如能采用蓄热和蓄冷装置，则可以对提高建筑物能效和实现二氧化碳减排做出巨大贡献。

基本而言，热量可以以显热或潜热的形式被储存起来：

- 当一种物质被加热时，会吸收热量，导致温度上升，这就是所谓的**显热**。
- **潜热**是指在相变过程中被储存起来的热量：一种物质在从固态到液态的相变过程中会吸收热量，温度却不升高。要使一种物质完全熔化，就需要相当于熔化焓的热量。所谓潜热蓄热，是指利用物质的相变过程（譬如从固态到液态）将热量储存在物质中（英文称 PCM，即相变材料）（请见图 1 中左图）

利用潜热形式而不是显热形式存储能量有诸多优点。由于潜热蓄热不不会造成温升，静态热损失小于显热蓄热方式，因为后者由于温度较高，总会向周边环境散失热量。此外，潜热蓄热材料会在温度没有上升的情况下将加热过程中接收到的能量储存起来，然后在某个时刻再将热量散发到周边环境中。我们可以利用这一原理来避免建筑物内出现高温（请见图 1 中右图）。

在建筑领域，适合使用无机水合盐与石蜡两种相变材料，这两种材料的熔化温度都在室温范围内。石蜡的主要特点是周期稳定性高，不易出现过冷。而无机水合盐的优点在于其熔化焓更高，同时也不可燃。此外，人们也使用水和冰作为蓄热及制冷手段，并获得了成功。譬如将这些方法与相变材料结合起来，就可以进一步优化。此外，也可以通过吸附方式来实现蓄热：比如可以使用沸石，沸石通过吸收和排出水分释放和存储热量。

在建筑领域使用蓄热蓄冷技术来提高能效

人们可以通过采暖和制冷等主动式空调方式对房间进行气候调节。但是，在这个过程中要尽量减少使用化石能源载体，以减少二氧化碳排放。为了提高能效水平，原则上有两种蓄热和蓄冷方法：

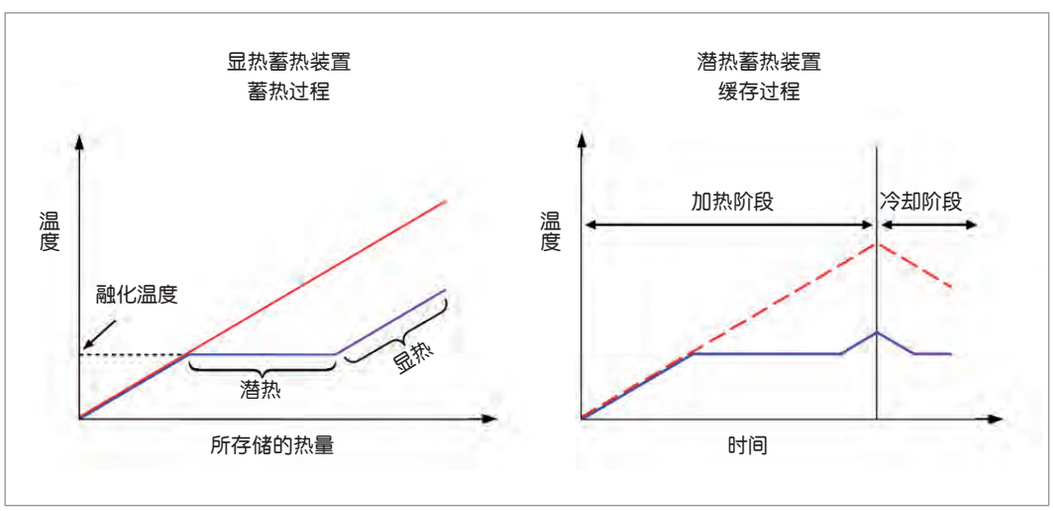


图 1
显热蓄热装置（左）和潜热蓄热材料（右）的工作原理。与显热蓄热不同的是，潜热蓄热并不会造成温升。

a) 一种是采用被动式空调技术，譬如用石料或混凝土建造建筑物，让这些实体建筑部件储存或缓存大量的热量。不过，在现代化的干式建筑结构中，人们有意尽量缩小实体建筑部件的体积，以便使建筑结构变得更加灵活且成本低廉。但是，如果在这种情况下还想采用被动式空调技术，就需要采用能够存储大量热量、由此将高温热量缓存起来的相变材料（图 2）。

b) 另一种方式是将蓄热蓄冷装置与主动式系统耦合起来。比如可以使用潜能较低的能源，以提高可再生能源的利用效率。此外，通过采用蓄热蓄冷装置移峰填谷，使建筑物中可以采用功率更小的空调系统。

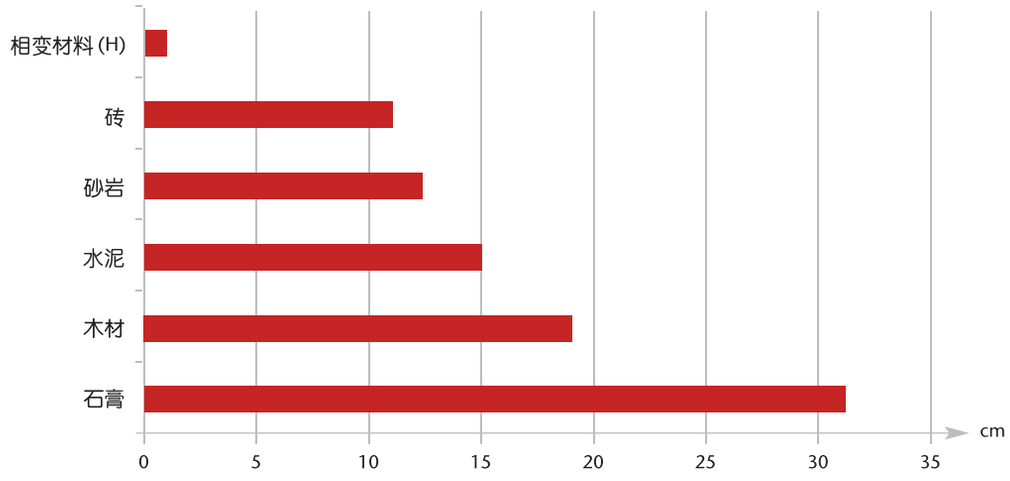


图 2
厚度 1cm 的相变材料在相变过程中的蓄热能力相当于一面 11cm 厚的砖墙或 19cm 厚的木墙在温度提高 10°C时吸收的热量。

1. 可用作潜热蓄热装置的复合材料

在建筑领域，有多种材料和系统可以用来作为潜热蓄热装置。其中，既有尺寸以厘米乃至毫米计的外封装系统，也有微米级别的微封装系统。经过特殊微封装的石蜡，可以安装在石膏抹灰层、石膏纸板或其他建筑材料中。如果在石墨板中加入相变材料，还可以额外提高石墨板的导热性，同时缩短蓄热和散热时间，这非常适合用在空调系统中。

2. 采用潜热蓄热材料的蓄热蓄冷装置

石膏抹灰层和石膏纸板适合用作被动式的蓄热蓄冷体，以便提高轻质结构的热容，使其达到实心建筑部件的蓄能水平。而这会在建筑物内形成一个高温缓冲的过程。这时，需要在夜间对建筑物进行通风，将白天存蓄的热量释放掉。这种过程也可以在被动式冷楼板系统中实现，冷楼板由掺有石蜡的石膏纸板组成，也可以将装有无机水合盐相变材料的塑料袋铺设在金属网格吊顶上。这类系统的制冷功率可达 25 到 20K/m^2。根据所采用的材料，可能需要主动式背通风系统，在夜间通过温度更低的室外空气对系统进行降温。

安装有冷水管的悬挂式冷楼板可以实现较高的冷却功率（约 100W/m^2），而且反应时间很短。不过，这种系统往往会造成制冷过程的峰值负荷很高。不过，如果结合采用相变材料，那么在白天制冷高峰时段，仅被动制冷方法便可以提供约 40W/m^2 的基本制冷功率。在夜间，相变材料在冷水的作用下得到再生。这样，既可以避免白天的负荷峰值，又可以平均分配制冷负荷。尤其是当利用地热（地热管）制冷时，这种方法就很有优势，因为地热管主要设计用于满足尖峰负荷的需要。

此外，将相变材料与内置式遮阳系统组合使用也很有发展潜力。与外置式系统相比，内置式系统有一些优势（不会受到风的影响，成本较低），因此可以大面积使用。不过，与外置式遮阳系统相比，内置式系统的能源获取量较高。此外在阳光的辐射下，内置式系统会强烈受热，金属薄板会将热量辐射到房间内靠近窗户的用户身上，使其感觉燥热难耐。此时，如果内置遮阳装置能使用相变材料，便可以有效防止这种情况的出现。其优点是百叶窗的温度降低，传入室内的热量也

会减少。所使用的相变材料应足以将夏季晴天照射在南墙上的热量完全缓存起来。与其他系统一样，相变材料可以通过夜间较冷的室外空气再生。

采用潜热蓄热材料对于建筑采暖来说也同样具有优势。其中的两个例子便是太阳能外立面组件（太阳能幕墙采暖）和太阳能空气集热器。在两种技术中，太阳能都以热能的形式被储存在相变材料中，过了一定时间之后再被释放到室内。当阳光非常强烈的时候，也就是说当太阳辐射过量时，热量会被储存起来，而当阳光不强烈或是没有阳光的时候，如果需要热能，所储存的热量就会被释放出来。同样道理，空调设备也可以使用相变材料，从而提高其性能。

3. 吸附式蓄热装置

除了相变蓄热，也可以采用吸附蓄热。有多种系统可以使用。沸石所利用的是对水的吸附和解吸能力。此外，也可以在相应的系统中通过吸附和解吸过程利用太阳能制冷，这种技术可以保证只有当需要冷量时 — 即当太阳辐射太强时 — 再进行制冷。

4. 家用蓄水装置

传统采暖系统中的热水箱同样也有助于提高能效，比如它能够使太阳能制热设备达到最佳利用效率。如果再使用相变材料，便可以降低备用热损失，缩小存储器体积，达到优化热水箱的效果。

此外，水箱也可用于建筑物制冷。比如收集屋面雨水，导入一个贮水器中，用于建筑物制冷。在这个过程中，水温会升高。到了夜间，雨水被泵打到建筑物屋面上，进行二次冷却。当水在屋面上大面积流淌时，会与大气进行辐射交换，或是通过对流和（部分）蒸发，将热量释放出去，理想状态下可以使水温略降到露点温度以下。冷却后的水再经过雨水槽和过滤装置返回贮水器，以便再次为建筑物制冷。除了上述开放式循环系统外，也可以采用封闭式系统，与成片的集热器相连接，这种系统不会因蒸发而损失水量。

研发的需求

研发需求主要在于如何通过测试技术确定采用相变材料的系统的特性，如何进行模拟工具的认证和如何制定可靠的设计规范。目前，这方面的示范项目正在进行中。此外，从建筑物用户的反馈也能直接看出他们对产品的认可度。另外，根据所测量到的负荷转移状况，供电单位可以通过能源经济分析，评价相变材料系统的大规模应用对电厂及电网容量的影响。

此外，有必要进一步加强复合材料的研发工作。比如，目前人们研发出了无机水合盐的外包层，利用它可以制造出毫米级的防渗漏、防水蒸气的封套，然后作为不可燃材料使用在建筑材料和建材板中。此外还可以作为填充料，用于风冷或水冷式空调机中。

有关方面还正在研究和优化可泵式系统及以石蜡和无机水合盐为基础的砂浆。

为了确保商业性相变材料产品的规定特性以及熔化温度、熔化焓和导热性能够满足要求，有关方面成立了相变材料品质协会，负责制定主要的质量标准。

旧建筑节能改造

- 既有建筑的节能潜力
- 旧建筑改造 — 技术应用实例
  - 乌尔姆 — 伯芬根教区中心“好牧人之家”改造工程
  - 布鲁塞尔的可再生能源屋（REH）
- 湿热通风方案

既有建筑的节能潜力

汉斯 • 埃尔霍恩（Hans Erhorn）
弗劳恩霍夫 IBP 研究所
hans.erhorn@ibp.fraunhofer.de

戈尔特 • 豪泽教授、博士（Prof. Dr. Gerd Hauser）
弗劳恩霍夫 IBP 研究所
gerd.hauser@ibp.fraunhofer.de

彼得 • 米夏埃尔 • 纳斯特（Peter Michael Nast）
DLR
michael.nast@dlr.de

迪特里希 • 施密特博士（Dr. Dietrich Schmidt）
弗劳恩霍夫 IBP 研究所
dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

在德国，降低能源消耗潜力最大的领域是建筑物的采暖和热水制备。在联邦交通、建设和城市发展部（BMVBS）发布的 2007CO_2 建筑报告[1] 分析结果中，不仅提出了可开发的节能潜力，而且确定了当前在开发节能潜力时存在的阻碍因素。在下文中，我们对其中的主要内容做简要介绍。

提高能源效率，扭转采暖能耗的发展趋势

在德国，建筑物的采暖和热水制备消耗了近 40% 的终端能源。其中有一半多被用于私人家庭房间的采暖。

令人欣喜的是，自 1996 年以来，该领域的能耗水平在逐年下降，到 2006 年，尽管由于诸多新建措施使居住面积增长了 10% 以上，但是能耗总量却仍相当于 1990 年的水平（图 1）。其原因在于，人们对建筑物围护结构采取了各种现代化节能改造措施，并提高了制热过程的能源利用效率。再加上越来越多地使用可再生能源。因此，从 1990 年到 2005 年，私人住宅领域的二氧化碳排放量降低了 16%。

改造率有所提高

每年接受全面改造的既有建筑的比例从 1994 年的 1.6% 提高到 2006 年的 2.2%。改造的主要目的是降低能源费用。迄今为止，还很少有业主仅仅以环境保护为改造动机的。可以确定的是，在过去数年中，居住建筑的采暖能耗减少了。其原因主要不是因为对新建建筑的要求提高了（因为每新建一栋建筑都会额外消耗能源），而是主要因为旧建筑改造工作的步伐在逐渐加快。

能源和成本节约潜力依然很大

总体而言，居住建筑的能耗水平依然很高。尤其是旧建筑具有很大的现代化改造潜力，因为在旧建筑领域，从 1989 年到 2006 年，仍有 70% 可实施的节能改造措施并没有得到实施，依然有待改造（图 2）。未经改造的既有建筑如果采取了保温措施，同时对采暖设施进行了现代化改造，则可以节约大量能源，从而减少二氧化碳排放。持续上涨的能源费用对私人家庭造成了沉重的负担。而由于改造工作开展得越来越多，质量水平也越来越高，同时对新建建筑的要求也得到了提高，预计未来到 2020 年之前，会再节约 190 到 510 亿欧元的采暖费用。

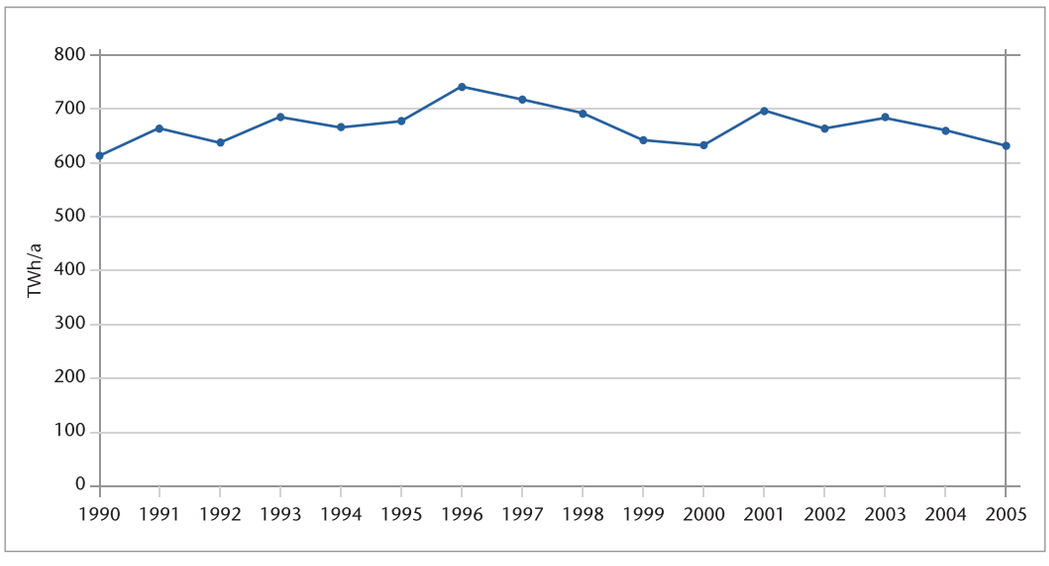


图 1
私人家庭采暖终端能耗，包括采暖电耗和集中供热

资料来源：联邦环境署 2007 年

1 资料来源：德国能源与水经济协会（BDEW）2007 年

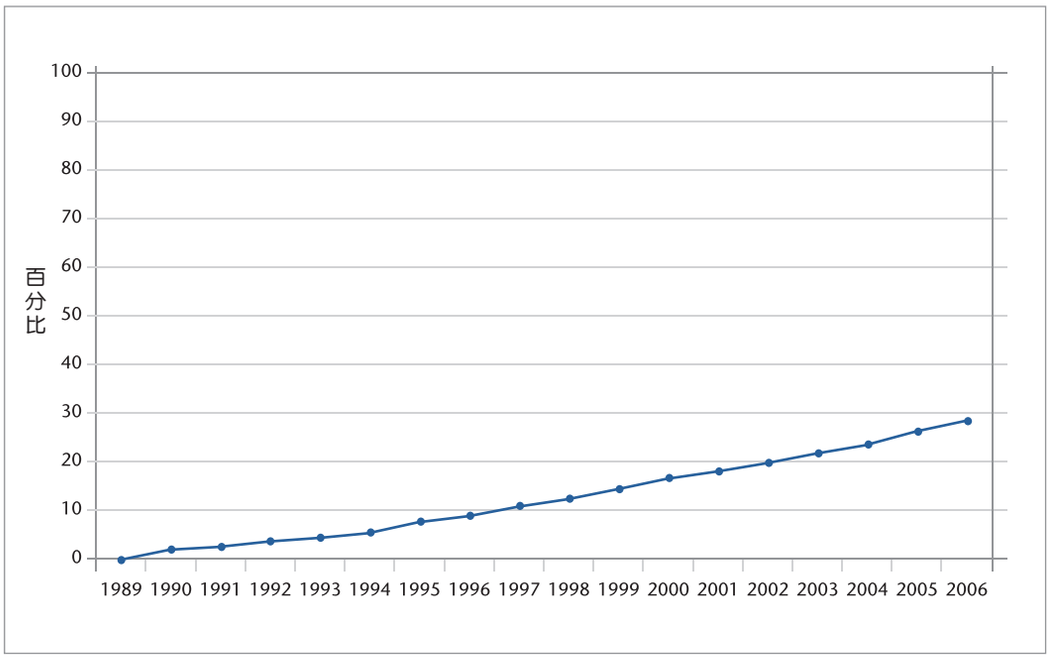


图 2
1989 年到 2006 年间旧建筑完全改造的累积比例（建筑年代从 1900 年到 1979 年）

资料来源：Technomar 业主调查，co$_2$online

保温措施日益重要

旧建筑所有者往往对自己的建筑物进行现代化节能改造的重要性和经济效益并不清楚。因为他们进行改造的首要目的就是降低能源费用。从上世纪九十年代起，有许多燃油采暖设备和燃煤炉被更换成燃气采暖设备。在 2006 年新安装的采暖设备中，燃气系统的比例几乎达到了 60%[1]。

同时，可再生能源的地位也在上升。从 2002 年起，人们对采用可再生能源的采暖系统越来越感兴趣。2006 年，德国所安装的热泵、木粒采暖系统和太阳能系统数量都创下了历史纪录。

当前有一种现象是，投资重点已经从更新既有建筑采暖系统转移到保温措施方面。人们对建筑物保温的兴趣非常高，其中一个原因是：有许多私有住房业主在对自己的采暖系统进行更新之后，现在又想做保温了（请见图 3）。

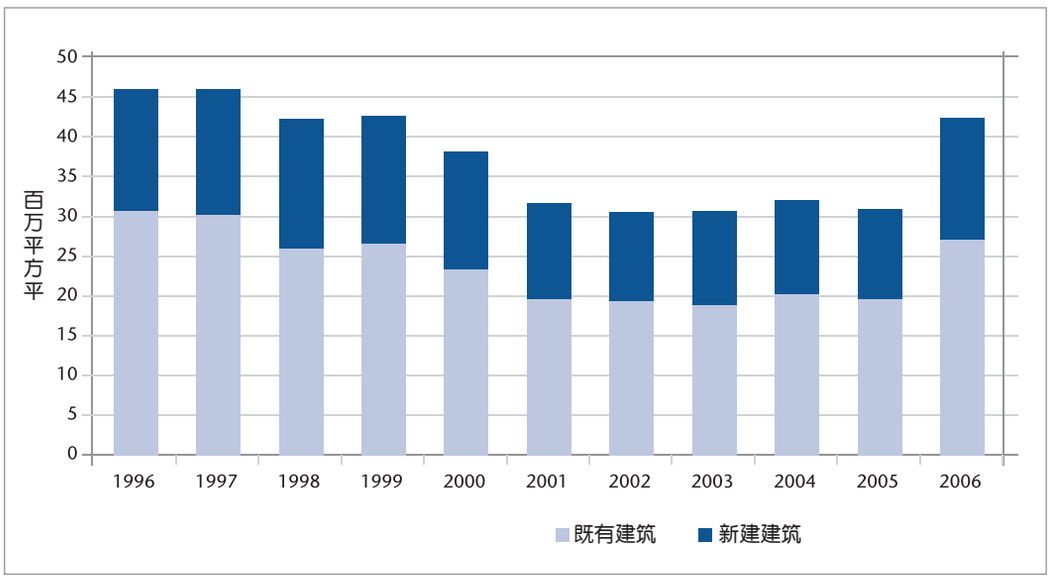


图 3
新建建筑和旧建筑的外墙外保温系统施工面积

资料来源：FWDVS 2007 年

1 联邦交通、建设及城市发展部（出版）：2007CO_2 建筑报告

公布各类资助

总体而言，虽然现代化改造的所有领域都在越来越多地选择高能效技术，但是，由此所带来的各种可能性并没有得到充分利用。其主要原因在于高昂的初始投资。为了更好地充分发掘巨大的节能潜力，房屋所有者和承租人就必须更好地了解高能效会给他们带来哪些好处。《节能法规》中的高要求，CO_2 建筑物改造计划增加的资助金额，还有各类的研究和示范计划，都对目前所取得的成就做出了重大贡献。仅 2006 年和 2007 年受德国复兴信贷银行资助的能效措施，就能在将来带来每年将近 300 万吨的二氧化碳减排量。

未来的前景

通过提高对新建建筑的要求和加大既有建筑的改造力度，实现可持续的二氧化碳减排：

在《气候能源一体化计划》（IEKP）[1] 中，联邦政府针对当前需要做的工作做出了内容广泛的决议。出于经济和生态方面的考虑，必须既要提高节能改造措施的改造率，也要加大改造力度。此外，还应当提高对新建建筑的要求，因为高能效建筑无论对出租人还是对承租人都是经济划算的。

2007 年 CO_2 建筑报告 [2] 的调查结果显示，通过将不同的、经济合理的措施组合起来，可以将采暖终端能源需求量以及由此所带来的二氧化碳排放量降低 20% 到 40%。为了达到 40% 的目标，需要采取内容广泛的措施组：

- 短期内将每年的建筑物综合节能改造率提高到至少 3%
- 将对改造措施能效质量水平的要求提高至少 30%
- 每年都要提高可再生能源在制热能耗中所占的比例
- 对于新建建筑，必须在短期和中期将能源需求分别降低 30% 和 50%（与 2007《节能法规》中的要求相比）。

大力坚持促研究、抓落实

自上世纪七十年代末以来，为推动高能效建筑方式在德国的发展，联邦政府开展了一项深入的研究和示范计划。如今，持之以恒开展资助计划的结果就是，低能耗建筑方式已经成为建筑标准。

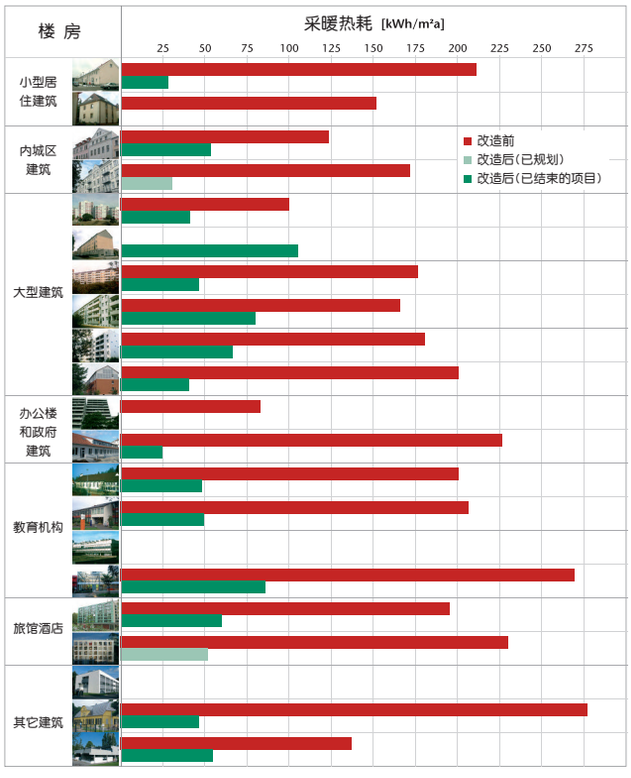


图 4
联邦资助计划 EnSan 示范建筑在改造前、后的采暖能耗。其中的绿色横杠表示的是两个采暖期的结果。凡是没有绿色横杠的房屋表示在进行节能改造后，还没有测量它们的采暖能耗。

资料来源：弗劳恩霍夫建筑物理研究所

1 联邦环境部 2008
2 联邦交通、建设与城市发展部（出版）：2007CO_2 建筑报告

图 5
联邦交通、建设与城市发展部（BMVBS）部长沃尔夫冈 • 蒂芬泽（Wolfgang Tiefensee）介绍能源证书。证书上注明了建筑物的总体能效状况。

资料来源：联邦交通、建设与城市发展部。

一个尤为重要的结果是，公开竞争的建筑和采暖企业纷纷实施大型示范项目，以此应对所面临的新挑战。

到上世纪九十年代中期之前，研发工作主要集中在新建建筑上，而从九十年代末开始，既有建筑也逐渐被列入研究计划。在示范项目中，人们针对不同的建筑类型和不同年代的建筑，采取了相应的高效节能示范解决方案。一般而言，这些措施实施后，建筑物的能耗值是改造前的三分之二，甚至常常低于具有可比性的新建建筑的最低要求。

研究计划的结果表明，通过高能效建筑方式和节能改造，各种建筑类型都有很大的节能潜力可以开发，同时也促进了新技术的市场化，并为德国能源署（dena）以及德国复兴信贷银行（KfW）高能效建筑和改造资助计划开展进一步的、更广泛的试点计划提供了新的思路。

能源证书展示了潜力

欧洲委员会在其《建筑物总体能效》指令中要求，将来在新建、购买或租赁建筑物时，都必须出具能源证书。该指令通过修订的《节能法规》（EnEV）于 2007 年 10 月 1 日在德国正式生效。

现场试验证明，那些委托为自己房屋出具能源证书的单户房屋所有者和私人房屋出租人，都对能源证书的功能、中立性及其所阐述的内容和认证方法表示“满意”或“非常满意”。而住宅建设公司则对出局证书需耗费的时间、自身费用和解释工作等方面略有怨言。在被调查者当中，有约一半的人认为房屋的总体评价符合他们的预期，另有近 30% 的人和不到 10% 的人分别预计会更好和更差。

能源证书有助于转变承租人和出租人在采暖和热水制备方面的成本意识。

旧建筑改造 — 技术应用实例

1. 乌尔姆 — 伯芬根教区中心“好牧人之家”改造工程

约翰 • 莱斯（Johann Reiß）
弗劳恩霍夫 IBP 研究所
johann.reiss@ibp.fraunhofer.de

导言

罗腾堡 - 斯图加特（Rottenburg-Stuttgart）主教辖区希望通过乌尔姆 - 伯芬根教区中心“好牧人之家”改造工程，展示教会在气候和资源保护方面可以做出哪些贡献。该教区内有大约 5000 栋建筑，每年为此投入大约 4000 万欧元。目前，在所有的建筑措施当中，有 90% 以上都是针对既有建筑。该计划已被列入由联邦经济技术部资助的“建筑物节能改造”项目中 [1]。

由于教区之家的屋面急需改造，于是有人建议对整个教区中心进行节能改造，同时充分利用太阳能。这个设想在教区委员会获得了广泛的支持。为完成这一复杂的任务，2000 年末，有关方面组织了一次建筑设计大赛。组织方要求设计方案在建筑设计中结合现代化改造措施，既要考虑教区中心的整体面貌，也要考虑每栋建筑的不同能效水平。也就是说，教区中心的整体外貌不应因改造而发生改变。同时，通过改造措施，应将建筑物采暖、饮用水加热的能耗，包括各种泵和风机的辅助能耗，至少降低 50%。

建筑物的现状

天主教教区中心“好牧人之家”始建于 1966 年，施工分两个阶段。1966 年修建了教堂和教区大楼，1974 年则又修建了牧师寓所和幼儿园。而本次改造包括了教区大楼、幼儿园和牧师寓所。三栋建筑都是平屋顶，外墙为混凝土清水墙。教区大楼的外墙有仅 4cm 厚的内保温层。而幼儿园和牧师寓所的保温层在承重墙和非背通风的饰面层之间。幼儿园位于一楼，没有地下室，地面有 4cm 厚的保温层，保温效果很差。

三栋建筑的屋面都铺有 6cm 厚的保温层，但保温效果只有大约 0.6W/m^{2}K，同样不能满足要求。木质复合窗的 U 值为 2.5W/m^{2}K。教区中心的这些建筑都为集中供热。热力入口位于教区大楼的设备间内。所有建筑物中都装有散热器。饮用水是通过分别位于幼儿园和牧师寓所设备间内的饮用热水箱进行加热的。而在教区大楼内，只有厨房有热水供应，使用电热水器加热。在改造之前，有关方面测量了一年的采暖热耗和电耗情况。

改造措施

改造后，教区大楼的外墙内保温层厚度增加到 10cm。所有屋面的原保温层都被拆除，更换为 22cm 的硬泡板保温层。教区大楼底楼的地面被挖至土层面，重新铺设防潮层，以阻隔日益增加的湿气，然后在上面铺设 7cm 厚的硬泡保温板。窗户被更换为双层隔热玻璃窗。内保温要求对靠近外墙顶板部分做一圈保温。幼儿园外墙原有的混凝土装设层和原有的 6cm 保温层被拆除，新做 14cm 厚的矿物棉保温层，另外还安装了 1cm 厚的纤维水泥板作为外墙板。

为了提高幼儿园室内地面的保温效果，同时又不增加地面厚度，铺设了一层 2cm 厚的真空保温板作为新地面，从而使地板的 U 值达到了 0.21W/m^{2}K。对于牧师寓所的外墙，首先拆除了混凝土外饰面层和原来的保温层，更换为 3cm 的真空保温板。这样一来，外墙结构并没有变厚，同时却能将外墙的 U 值从 0.55W/m^{2}K 降低到 0.28W/m^{2}K。外墙经过上述保温后，依然保留了建筑物外立面的原有面貌。幼儿园和牧师寓所的窗户采用了三层保温玻璃木窗。

保留原有的集中供热方式。在一二次回路之间增加了一台热交换器，可以根据建筑物的热需求，调节送水温度。供暖系统中的泵全都更换为压差调节泵。三栋建筑中的所有房间都安装了分室控制装置。在改造前，教区大楼安装了一台没有热回收功能的通风设备，但很少使用。现在这台通风设备被弃用，而是通过窗户对房间进行通风。幼儿园和牧师寓所安装了一台带热回收功能的进排风设备和一台太阳能设备，用于饮用水辅助加热。在教区大楼的屋顶上安装了一台功率为 19.0kWp 的光伏设备。此外还在教区大楼与房间齐高的窗户外安装了光伏发电板（1.95kWp），这些发电板同时还起到了遮阳的作用。在楼外的三根圆柱上，安装了总面积 8m^2 的光伏元件，总发电功率可达 1.0kWp。原有的灯具全部更换为节能灯。

检验测量

为了在真实的使用和气候条件下对建筑物的能效和热工性能进行分析，并确保节能方案的设计和实施效果，并调查出教区中心各用户的行为特点，有关方面进行了为期两年的长期监测，同时也对真空保温板的长期稳定性进行了检测。

经过两年的测量，人们获得了大量数据，其中最为重要的是气候边界条件、室内气温以及能耗情况。在两个测量年度，2006 年的采暖度日数 Gt20/15 为 3890Kd[1]，2007 年是 3607Kd，而多年平均值为 4296Kd，该值在乌尔姆地区极具代表性。在第一个测量年度，尚没有全面采用分室控制装置，原因是在编程和操作指导过程中存在问题和拖延现象。教区大楼在采暖期的平均室温是 18.2℃，幼儿园是 20.9℃，而牧师公寓则是 19.5℃。2006 年和 2007 年，改造前后经过气候校正的采暖能耗见图 1。

2006 和 2007 两年所测得的能耗平均值显示，经过改造，教区大楼、幼儿园和牧师寓所的能耗分别下降了 73%、48% 和 53%。尽管照明系统和采暖循环泵被更换了，但所有三栋建筑的电耗还是增加了。这主要是由于通风设备能耗以及办公电器数量有所增加。表 1 列出了三栋建筑在改造前后单位使用面积的一次能源消耗以及单位面积的入网发电量，其中入网发电量被折算成了一次能源。

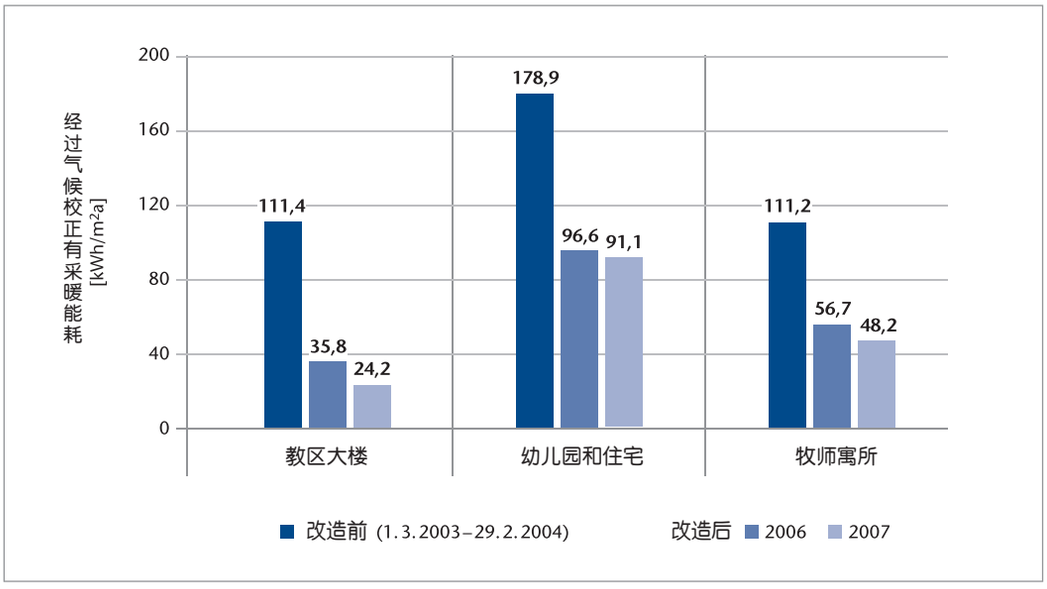


图 1
经过气候校正的改造前后采暖能耗

时间段	一次能源消耗 [kWh/m²a]		
	总能耗	发电获得的一次能源	净能耗
改造前	150,5	0	150,5
改造后			
2006	89,4	36,7	52,6
2007	82,3	40,1	42,2

表 1
三栋建筑的平均一次能源消耗和从发电中获得的一次能源。面积数据为三栋建筑的总使用面积 1579m²。

在减去入网发电量后，测量年度 2006 年的一次能源消耗由原来的 89.4kWh/m²a 降低到了 52.6kWh/m²a，而第二个测量年度的一次能源消耗则由 82.3kWh/m²a 降低到了 42.2kWh/m²a。

1 Kd（度日数）是采暖度日数的计量单位。

结论

罗腾堡 - 斯图加特主教教区为自己所设定的目标是，为了“保护上帝的造物”，未来将以身作则，加大投资力度，提高教区内建筑物的能效水平。因为教会在公众面前要起到模范带头的作用。乌尔姆 - 伯芬根的“好牧人之家”决定对教区中心进行节能改造。改造前，人们进行了综合规划，在改造完工后，又进行了为期两年的检查测量，从中获得了以下重要认识：

综合设计是此类与标准改造措施有明显差别的项目得以顺利实施的前提条件。这就需要所有参与方都要积极行动起来，打破自己的原有习惯。设计事务所的技术人员在实施此类项目时，原本有他们自己习惯的时间进度，而现在却面临着巨大的时间压力。综合设计必须获得足够的酬金，也要为设计人员留出必要的时间。在幼儿园室内地面下安装真空保温板的工作进行得非常顺利，因为人们事先准确测量了待铺设的保温板的尺寸。较为困难的是牧师寓所外墙保温板的铺设工作。外墙表面不平整的地方必须首先抹平，而接下来对墙面面积的测量工作不够精确，结果总会出现 1 到 2cm 的缝隙，后来又用聚氨酯现场发泡[1]将缝隙填平。通过测量地面各结构层的表面温度，可以证明经测量的保温板在测量期间是完整无损的。采用抽样的方式，对 6% 的保温板进行了测量检查。为了准确调查出保温板的长效性，还应再持续测量几年。铺设在住宅寓所外立面上的真空保温板在整个测量期间都证明是完好无损的。但从这些结果还无法推导出未来会怎样。

所有三栋建筑的采暖总能耗比改造下降了 59%。但是，终端能耗却只降低了 50%，原因是改造后电耗反而增加了。

综合设计主要关注的对象是建筑物外围护结构的保温，在这方面完全达到了目标。然而，人们却很少考虑到那些耗电设备。未来在设计时，必须进行有针对性的选择，因为电的一次能源系数要数倍于集中供热的一次能源系数。

二氧化碳排放量降幅比设计预期的低，生物质热电厂投入运行后的二氧化碳排放系数没有像乌尔姆集中供热公司最初预料的那样降低到 0.072kg/kWh，而只是降低到 0.160kg/kWh。

用真空保温板对幼儿园地面以及牧师公寓外墙进行保温处理是此次改造的重点。事实表明，墙体方面还需要做进一步的研发工作。用于固定盖板的金属铆固件不应破坏保温板的良好保温效果。

1 可以用液体原料进行聚氨酯现场发泡（现场发泡）。

参考文献

[1] 约翰 • 莱斯（Reiß, Johann）：建筑物的能效改进，子方案 3：利用测量技术对使用真空保温板的教区中心改造效果进行认证。最终报告。IBP 报告 WB 140/2008。
http://archiv.ensan.de/pub_index81.html

旧建筑改造 — 技术应用实例

II. 布鲁塞尔的可再生能源屋（REH）

埃尔克 • 施特莱歇（Elke Streicher）
斯图加特大学热动力和热技术研究所（ITW）
streicher@itw.uni-stuttgart.de

位于布鲁塞尔的“可再生能源屋”告诉我们，历史建筑也能通过采用可再生能源，满足全部能源需求。该建筑是多家从事可再生能源工作的欧盟协会组织的总部所在地，譬如欧洲可再生能源理事会（EREC）、欧洲生物质能协会（AEBIOM）、欧洲地热能源理事会（EGEC）、欧洲太阳热能工业联合会（ESTIF）以及欧洲协会可再生能源研究中心（EUREC Agency）。这栋拥有 140 年历史的老建筑在经过高效用能改造并采用了可再生能源技术后，已经成为一个示范项目。该楼有约 2800 平方米办公面积，同时还具有示范意义：建筑设计师和规划师可以在这里现场了解，在满足文物保护要求的情况下，有哪些整合利用可再生能源的方法。

人们利用建筑物动态模拟软件，根据该建筑物及其周边环境，设计出量身定制的能源利用方案。该方案有以下三个关键部分：

- 减少建筑物与周边环境的热交换
- 使用热回收技术
- 利用以可再生能源为基础的高效能源系统

该方案的目标是，通过实施这套能源利用方案，用可再生能源满足建筑物采暖制冷的全部能源需求。为此，人们首先采用了提高能效措施，尽可能降低采暖、通风和空调的年能耗。

措施的实施过程

对于历史建筑，往往由于文物保护方面的规定，无法实施全部的技术措施，因此经常要做出妥协，提出专门的解决方案。然而，布鲁塞尔的这栋“可再生能源屋”却告诉我们，气候保护和文物保护完全可以一举两得。

在实施的所有提高能效措施中，除了在屋面和背面外立面安装保温层之外，还更换了窗户，安装了带热回收装置和控制系统的机械通风设备，使用了特别节能的氖光灯管（T5 荧光灯管）。这样一来，与标准的旧房改造项目相比，该楼的能源需求量可以降低 50%。

所需的剩余能源是通过可再生能源来提供的。该楼利用固体生物质（木粒）、太阳能和地热能作为能源，使用相应的采暖、制冷和空调技术，确保了良好的房间舒适度。保证全年冬季室温不低于 21℃，夏天不超过 25℃。在冬季，木粒锅炉（85kW+15kW）和太阳能集热器（30 平方米平板集热器 +20 平方米真空管集热器）所产生的能量被储存在两个容量均为 2000 升的热水箱中，既可以供应采暖热水，也可以为楼内的通风系统供热。原先用于存放煤炭的房间被用来储存木粒。木粒每年进货两次，用卡车运输，每次 13 吨，被吹入两个附属房间中，木粒从这里被自动送入木粒锅炉中。该楼使用了太阳能和生物质联合方案，用来给前面的总使用面积为 2600 平方米的三栋建筑供暖。一套地热泵设备则为后面的一栋建筑和会议室（200 平方米）供热。功率为 25kW 的热泵安装了四根串联在一起的垂直地热探针，深入地下 115 米的深度，将温度为 10 到 12℃的地热转化为 35 到 45℃的热量。这些热量被储存在一个容量 400 升的热水箱中。在夏季，该楼采用了热驱动的吸收式制冷机为整栋建筑进行制冷。吸收式制冷机主要是依靠太阳能集热器所提供的热量来驱动，用木粒作为备用燃料。温度为 80 到 85℃的热水被输入吸收循环系统中，用来生产冷却水（7 到 9℃）。冷量能被储存在一个容量 1000 升的水箱中，用来为通风设备制冷。而废热（吸收式制冷机所产生的多余低温热量）则通过四根地热探针输回到地下。

这栋文物保护建筑也为整合各种光伏模块技术提供了可能性。之所以要这样做，目的是通过多种不同的技术，使来访者了解到有多种整合发电的可能性。其中既使用到了单晶和多晶光电板，也有薄膜光电板。为了与外形设计相契合，使用了各种半透明的太阳能电池，其中有部分电池被集成在窗户上。安装总容量为 3kWp，每年可发电 2550kWh 左右。剩余的用电需求量通过购买“绿电”来满足，即由风能、生物质能、热电联供和小型水电厂多种形式所发的电。

图 1
布鲁塞尔的“可再生能源屋”，花园房的屋顶上安装了光伏设备

成功的示范项目

“可再生能源屋”既是许多欧洲协会组织的办公楼，堪称是欧洲可再生能源的总部，同时对建筑设计师和规划师而言也是一个示范项目。在两年半的时间内，这栋建筑物吸引了 1 万 5 千多人到比利时首都前来参观。如今，“欧洲智能化能源”资助计划（IEE）已经启动了一个欧盟项目，由欧洲可再生能源理事会（EREC）[1] 负责协调，该组织也是“可再生能源屋”的策划单位之一。修缮这栋拥有 140 年历史的建筑的想法来自比利时的劳伦特王子及其名下的 GRECT 基金会。该基金会的宗旨是保护和维护欧洲的建筑文化遗产。而“旧建筑新能源”（New4Old）[2] 项目的宗旨是，让在历史性建筑上整合使用可再生能源和提高能效的工作变得更加便捷。在该项目执行期间，根据所获得的经验，还有其他一些“可再生能源屋”在欧洲陆续建成。

参考文献

[1] http://www.erec.org/projects/ongoing-projects/new4old.html

[2] http://www.itw.uni-stuttgart.de/~www/ITWHomepage/News/new4old.pdf

湿热通风方案

克劳斯 • 赛德鲍尔教授、博士（Prof. Dr. Klaus Sedlbauer）
弗劳恩霍夫 IBP 研究所
sedlbauer@hoki.ibp.fraunhofer.de

哈特维希 •M• 昆策尔博士（Dr. Hartwig M. Künzel）
弗劳恩霍夫 IBP 研究所
kuenzel@hoki.ibp.fraunhofer.de

安东 • 马斯教授、博士（Prof. Dr. Anton Maas）
卡塞尔大学
建筑、城市规划、景观规划系
建筑物理专业
maas@asl.uni-kassel.de

导言

在过去的几十年间，有越来越多的既有建筑出现了墙体霉变的现象。其主要原因是保温技术措施（如更换窗户）提高了建筑物外围护结构的气密性，在没有额外通风措施的情况下，就会导致室内空气湿度增加。在这种情况下，一种常见的说法是：住户应通过短暂开窗开门进行通风。但遗憾的是，事实证明这种方法并不有效，因为这种做法没怎么考虑建筑物内真实的湿度特性。短暂通风主要是为了换换空气，但又不想损失太多热量。所以新风输入的时间要短，尽量避免天花板和墙壁中的热量散失到室外。如果目的是要祛除异味或是排掉室内过浓的二氧化碳，那么短暂通风是合适的。但是，如果想要将由住户所产生的湿气排出去，那么这种通风方式的效果就有限了。由于大部分湿气 — 与热量类似 — 是储存在建筑物围护结构和室内家具中的，因此即使开门开窗，这部分湿气也排不出去，原因是湿气交换的过程要明显慢于室内空气与建筑物围护结构之间的热交换过程。

那么，什么才是正确的通风方式呢？应当采用怎样的通风方案，才能控制好室内空气湿度，从而完全避免建筑物内出现墙体霉变的现象呢？要想回答这些问题，需要以下辅助手段：

1. 所谓瞬态的 — 即与时间相关的 — 室内气候模块，它们可以贴近实际情况地描述建筑物围护结构与室内空气之间的热、湿交换过程。

2. 一个能够对敏感的建筑部件表面（如热桥）霉变的风险进行估测的模块。

只有将这些模块结合起来使用，才能制定出恰当的通风方案，既能使建筑物内维持较高的卫生水平和舒适度，又能尽量降低通风热损失。以下我们将介绍这类模块及其用途。

建筑物围护结构中的热湿传递过程

弗劳恩霍夫建筑物理研究所开发出了一套便于实际应用的软件程序，可以对建筑部件中的耦合热湿传递进行瞬态计算，这便是 WUFI®（即“瞬态的热与湿气”的德文词组的首字母缩略语 [1]）。鉴于有关该软件的专业出版物数量与日俱增，表明该方法已经越来越广泛地得到了应用。由于稳定性蒸汽扩散法有很大的局限性，因此，新版的 DIN 4108-3 标准 [2] 中也提到了这种瞬态湿热计算模块。从去年起，EN 15026 标准 [3] 建议人们在实际工作中采用湿热计算方法来评估建筑部件的潮湿状况。在这里，我们以 WUFI® 计算程序为例，介绍一下湿热模拟的基础知识和前提条件。根据在 [1] 中所描述的湿热传递基本物理原理，我们可以开发出一套完整的微分方程组，计算自然气候条件下多层建筑部件的湿度特性。其中要考虑到以下传递机制：

- **蒸汽扩散**：分子在气体状态下受热时的固有运动。
- **表面扩散**：液体在由吸湿性物质组成的吸着膜上的传递。
- **毛细作用**：液体水在多孔建筑材料的毛细管中的传递。

要想计算湿气在多孔材质中在非等温状态下的传递状况，需要有两种独立的传动势能。如果选择了真正的湿度驱动力“蒸汽压力”和“毛细压力”，就可以得出简单的、从物理学角度看非常可信的传递系数。毛细压力较难测量，但它可以通过 Kelvin 方程 [1] 转换为相对湿度。这样，蒸汽压力和相对湿度就成为两个经受过物理论证的湿度传递势能，不仅为众人熟知，而且便于测量。要想利用 WUFI® 软件来计算建筑产品的热湿特性，就需要了解以下信息：

- 待计算的建筑部件的结构以及数字网格 [2]，网格的大小根据层结构以及预计的当地气候影响进行调整。
- 出现在建筑部件结构中的各种建筑材料的湿热参数值；即原始密度、孔隙率、单位热容、与湿度相关的导热性、与湿度相关的水蒸气扩散阻力，如果是吸湿性的、具有毛细作用的材质，还要包括吸潮过程和继续分布过程中的湿气存储函数和液体传导函数。
- 建筑物内外的气候边界条件，以及气候数据和规定计算精度所涉及到的规定时间段。气候参数是温度、空气相对湿度以及太阳辐射量、降雨量及风速的每小时平均值。

1 在毛细压力和空气相对湿度之间存在明显的 Kelvin 关系。
2 利用数字网格，可以对真实的建筑部件进行模拟和计算。

得出的计算结果便是温度、湿度以及经过建筑部件边界的热量流和湿气流的每小时变化情况。从这些结果中，既可以得出建筑部件不同位置的湿热参数（温度、相对湿度、含水量）在较长一段时间里的变化趋势，也可以得出这些参数在不同时间点的分布情况（分布图）。一种适当而生动的结果演示方法便是像放电影一样，按顺序展示各个瞬态的湿度和温度分布情况。图 1 举例展示了这样一部影片的“抓拍瞬间”，它是在计算一面双层墙体的湿热特性过程中产生的。

室内气候模块

与应用非常广泛的建筑物能效模拟方法不同的是，室内气候模块还应考虑到建筑物内复杂的瞬态湿气传递和交换过程。这就意味着，此类模块需要将建筑物模拟与建筑部件湿热计算结合起来 [4]。通过这种结合，人们便可以同时考虑室内空气和建筑物围护结构之间所发生的热、湿交互作用，譬如当室内湿度发生变化时，会有部分湿气储存在四周的围护结构中，或是当建筑部件表面温度发生变化时（比如在太阳照射下，建筑部件温度升高，或是夜间温度下降），围护结构会吸收或释放潮气。这种新技术的一个主要目的便是提供适当的设计工具，以便在降低建筑物空调能耗的同时，还能确保建筑物能拥有卫生、舒适的室内气候。通过有的放矢地利用建筑体或特殊安装部件的蓄热、蓄湿能力，在不使用价格昂贵的技术设备的情况下，将室内气候的波动尽可能降到最低水平。

为此，人们开发出了室内气候模块 WUFI®-Plus 软件。WUFI®-Plus 由一个室内平衡计算模块组成，可以将任意多的一维 WUFI® 建筑部件模拟结果和它耦合起来。具体的模拟数量要看房间里有多少个结构和朝向都不同的围护表面。在图 2 中，举例展示了如何在屋面和外墙表面上进行耦合。当表面上存在热桥时，虽然和面积大得多的不受干扰的区域（建筑部件标准横截面）相比，在大多数情况下对室内气候没有较大影响，但是反过来，室内气候却会对温度湿度比以及热桥部位的霉变风险产生重大的影响。这种情况同样发生在存在其他潮湿状况的墙体上，譬如墙体结构局部潮湿，或者当基层湿度不断上升时。在这种情况下，室内气候模块 WUFI®-Plus 的计算结果就可以作为建筑部件二维计算（譬如利用 WUFI®2D 软件）的输入值来使用，见图 2 右下角的图形。这样，就可以相当准确地确定建筑物围护结构关键点的瞬态湿热条件。

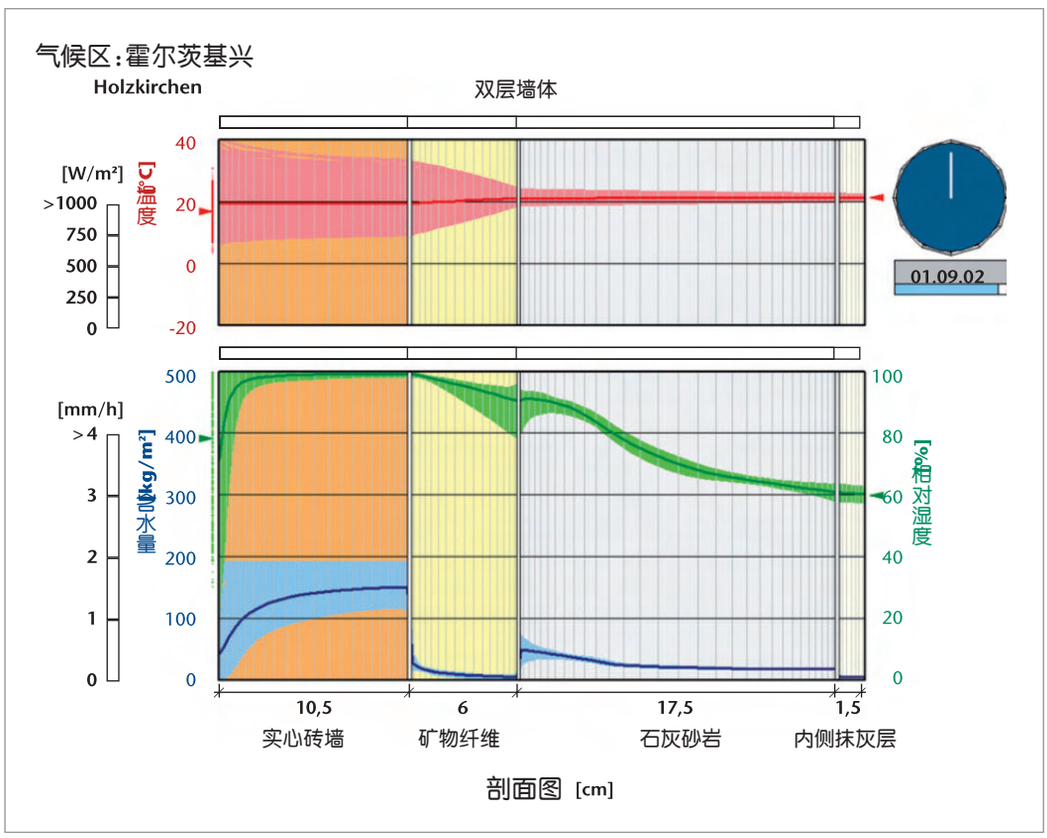


图 1
以电影胶片抓拍方式表现的一面双层的西外墙（带内芯保温板）在八月期间各层结构的瞬态温度、湿度分布图

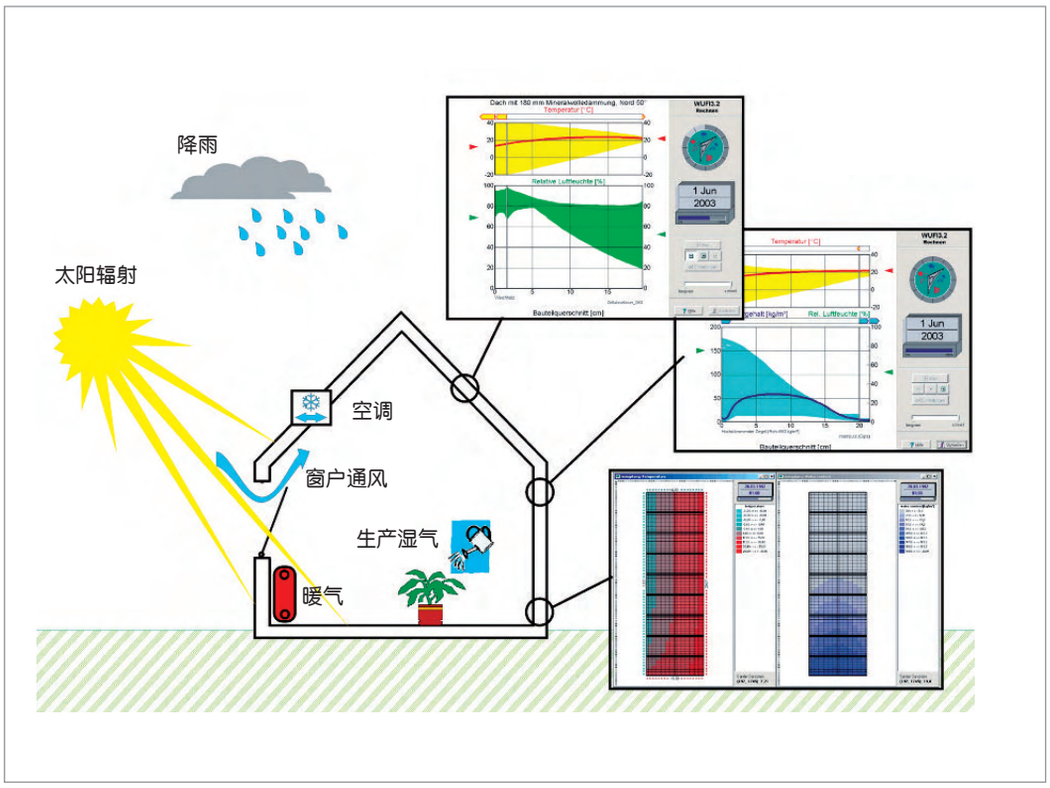


图 2
室内空气与建筑物围护结构之间湿热交互影响效果的分析模块关系图

图片来源：弗劳恩霍夫建筑物理研究所

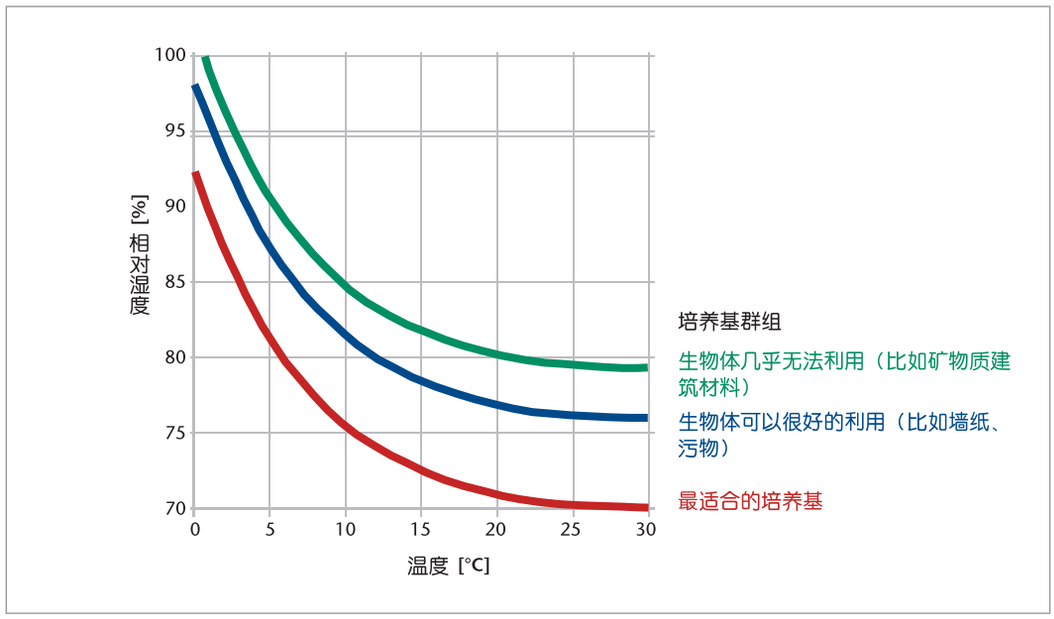
霉变风险诊断模块

为了预测是否会霉变，应当将霉菌生长的生物学条件（理想值）和湿热条件进行比较。在确定“实际值”时，应当考虑到所有会产生影响的建筑物理过程。现代化的湿热计算方法为此提供了很好的前提条件。在实际建设过程中，尤为重要的是要对建筑物表面及建筑部件内部的霉变风险进行评估。由于温度湿度比会对霉变产生重要影响，因此，如果能够准确了解湿热条件及其在不同时间段的变化情况，就可以推导出霉变概率的大小。为了从建筑物理的角度来描述主要影响参数对霉菌生长的影响，开发出了一套生物湿热模型（WUFI®-Bio）。这套模型可以计算出在不同瞬态边界条件下的孢子湿度，也就是说，要考虑到这段时间里霉菌孢子的干燥情况。

这种瞬态方法的原理是，一棵霉菌孢子由于体内存在的物质，会具有某种渗透势能，通过这种势能，它可以从周边环境吸取水分。这种势能可以借助一个储湿函数计算出来。该模块借助扩散拟设法，确定孢子壁的吸湿能力。当孢子内部存在一定数量的水分时，物质交换就会开始，不管外部条件如何，霉菌都会对体内的物质交换过程进行自我调节。人们对这种复杂的控制机制认识很少，因此难以用模型的方式来对其进行描述。不过这也不必要，因为实际上水分根本不该达到足以产生生物活动的限度（最大含水量）。利用图 3 所示的与培养基相关的最小条件（LIM），可以确定最大含水量，这便是霉菌孢子可能发芽的最低湿热界限值。这种模型已经被广泛地成功应用于对霉变所造成的损害进行评估，具体介绍参见 [5]。

图 3
[5] 中关于霉菌孢子发芽所需要的、与培养基相关的最低湿热条件（LIM）

图片来源：弗劳恩霍夫建筑物理研究所



室内气候模型与霉变诊断模型的组合

有关文献数量的增加显示，尽管保温标准在不断提高，但霉变现象对健康的威胁始终是一个非常重要的话题。一个主要原因是，人们对节能的认识理解有误，导致房间的通风要么不足，要么是错误的。另一个原因是，虽然要想避免霉变就需要进行通风，但通风是个非常复杂的问题，其效果取决于气候边界条件、建筑结构、受使用行为影响的湿负荷以及内墙表面和家具的吸附性能。尤其当室内湿度很高时，如果采用不科学的手动开窗通风方式，可能会造成霉变。尤其是当想要避免因潮湿而造成建筑物损坏时，即使用户不在室内，也要保证通风充足。其中，由于使用行为和各个房间的湿度都不同，造成对通风的需求也不一样 [6]。如果能将一套室内气候模型（WUFI®-Plus）和一套霉变风险诊断模型（WUFI®-Bio）组合起来，那么就可以得到合理的通风策略。不过在计算时需要注意，尤其是在房间的角落部位，由于结构几何而导致热桥及表面热过渡系数 1）降低，会造成墙体表面温度过低，从而导致表面湿度增加。

在给定通风形式后，计算出房间角落处的非稳态温度和湿度变化曲线，然后以迭代方式计算出采用短暂开窗通风或窗缝通风时，所要求的换气次数或开窗时间。根据计算结果，再利用 WUFI®-Bio 软件对霉变风险进行评估，然后对通风方案进行调整，直至达到正好需要的换气次数。

从图 4 的例子我们可以看到，在对一栋没有或带有晾衣间的、采用外墙外保温系统的住宅的一间卧室进行长期通风及短暂开窗通风时，不同时间段所产生的湿度情况，以及在这种情况下如想避免霉变所必需的通风条件。在图示的恒定最低换气次数（红线）及最低短暂换气次数（粉红线）的情况下，房间角落处的表面虽然会出现潮气，但是经过 WUFI®-Bio 软件计算，却正好低于霉变所需的霉菌生长条件值。而图中的绿线则是计算所取的、包含在恒定最低换气次数中的渗透换气次数。从图中可以明显看出，如果在房间中晾晒衣物，那么房间的湿度会增加。如果要晾晒衣物，那么仅在早晨短暂开窗通风不足以阻止墙体霉变，而是必须每天三次开窗通风。

1) 内表面热过渡系数是指空气向墙体内表面传热过程的特性。在欧洲标准中用 α 表示，单位为 W/m^2K。内表面热过渡系数受流动物质的物理特性、流动形式和流速、流体所接触物体的几何形状尺寸和表面特性的影响。在正常情况下自由流动空气的内表面热过渡系数 α = 3...20 $W/(m^2K)$，强制流动空气的数值为 α = 10...100 $W/(m^2K)$，冷凝蒸汽的数值为 α = 2000...100.000 $W/(m^2K)$。在分析霉变风险时国内常用表面传热阻表示。- 译者注

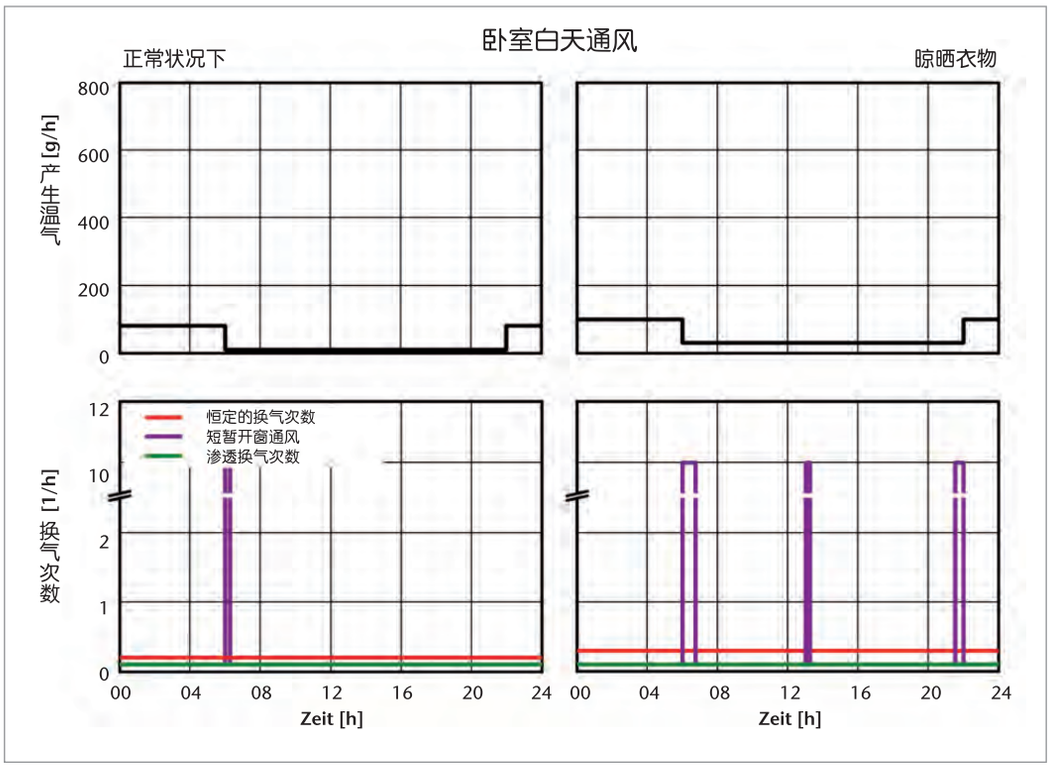


图 4
上：一栋在起居室内晾晒衣物（左图）和不晾晒衣物（右图）的、保温良好住宅的卧室内，在不同时间段内湿度的估计变化情况

下：为避免墙体霉变所必需的长期通风及短暂开窗通风。图中还显示出了渗透换气次数。

图片来源：弗劳恩霍夫物理研究所

结论

利用前面所介绍的将室内气候模型和霉变诊断模型相结合的方法，可以量化确定防止建筑部件表面霉变需要的换气次数。由此可以计算出通风设备的送气量设定值和采用按需调节系统时室内空气相对湿度的额定值。此外，还可以针对自由通风方式（开窗通风）提出通风策略建议；当然，一个必需的前提条件是：用户要合理使用这些措施。

参考文献：

[1] H.M. 昆策尔（Künzel）：利用简单参数对耦合热湿传递进行一维和双维计算的方法。博士论文。斯图加特大学，1994

[2] 德国工业标准（DIN）4108-3：建筑物的保温与节能 — 根据气候变化进行防潮。2001 年 7 月。

[3] DIN EN 15026 标准：建筑部件和构件的热湿技术特性 — 湿气传递状况的数字模拟评估。2007 年 7 月。

[4] A. 霍尔姆（Holm）；J. 拉东（Radon）；H.M. 昆策尔（Künzel）；K. 赛德鲍尔（Sedlbauer）：房间湿热特性的计算方法。WTA 系列丛书（2004），第 24 册，第 81-94 页。出版单位：WTA 出版社，慕尼黑。

[5] K. 赛德鲍尔（Sedlbauer）：对建筑部件表面及内部霉变的预测。博士论文。斯图加特大学（2001）。

[6] W. 里希特（Richter）；Th. 哈特曼（Hartmann）：住宅内避免墙体霉变所需要的最小换气次数。VDI 报告，Nr. 1603（2001），第 121-130 页。

论坛讨论：建筑节能改造 — 现存障碍、研究需求和解决途径

主持人：
达格马 • 戴默尔（Dagmar Dehmer）《Der Tagesspiegel》日报 Dagmar.Dehmer@tagesspiegel.de

参与讨论：
克努特 • 库伯乐博士（MinR Dr. Knut Kübler ）联邦经济部处长 knut.kuebler@bmwi.bund.de

洛兰特 • 诺伊纳尔（Roland Neuner）Schott Solar 有限责任公司 roland.neuner@schott.com

兴里希 • 雷耶茨（Hinrich Reyelts）DGS 太阳能建筑专业委员会主席 buero@reyelts.de

迪特里希 • 施密特博士（Dr. Dietrich Schmidt）弗劳恩霍夫建筑物理研究所 dietrich.schmidt@ ibp.fraunhofer.de

因格利特 • 福格勒（Ingrid Vogler）德国居住建筑企业联合会 vogler@gdw.de

主要问题

戴默尔：为什么虽然项目支持资金高达数十亿，但建筑节能改造的进展还是如此缓慢？

业主、住宅公司、工业企业、政府和科研机构各存在哪些障碍？

如想确保节能改造的顺利进行，需要哪些措施来保证，需要进行哪些方面的研究？

起步阶段的失误损害了节能改造的形象

福格勒：太阳能利用依然还有点受到先前经验的束缚。人们经常在不知道房屋实际用水需求的情况下就安装了过大的设备。不过某些时候也的确无法得知实际的需水量。比如在对勃兰登堡的一栋楼宇进行全面改造的时候，设计人员按照家用住宅的需求进行了规划。但实际上每户只有一人或两人入住。所以设备的设计尺寸就过大了，而且也不经济。如果不考虑实际用水量，那么太阳能热水器再漂亮也没有用。现在住宅楼的用水量通常为每人每天不超过 12 升，而有些太阳能热水器的容量能达到 50 升，目前常见的容量为 20 升。这方面我们必须要认真考虑。

密封窗的改造也出现过问题，很多建筑在未做保温改造的情况下就跟风安装了密封窗，如果只安装了一扇新窗户，那么可能很快就会出现通风问题和霉斑。这种情况尤其发生在能源价格上涨的时候。因为为了节省开支，房间采暖时只把温度控制在 16 摄氏度。

用户的疑虑

施密特：在弗劳恩霍夫建筑物理研究所（IBP）与用户交流时，我们发现，业主和住户对整个改造过程存在很大的疑虑。他们虽然理应参与改造过程，但改造对他们并不是迫切需要的，因为房子并不会倒塌，而且用户也无法弄清楚到底要如何改造：“如果我委托别人改造房子外立面的话，那么接下来是不是或许还要改屋面，然后是技术设备？如果是这样的话，首先是起居室没法住人，之后就是厨房和卧室。那岂不是说我们都要搬进孩子的房间？”所以我想，各方面都还需采取许多增进用户信任感的措施。

戴默尔：库伯乐先生，您觉得联邦经济和科技部所支持和推动的能源咨询工作对于消除单户房屋业主的这种疑虑有参考价值吗？

库伯乐：如果看一下各个社会阶层的情况，我们就会发现，节能改造对许多人来说压根儿就没有吸引力。比如说，节能改造的回报期长达 20 或 30 年，对于 70 多岁的老人来说还有投资的吸引力吗？很显然，答案将是否定的。

雷耶茨：我不同意。因为我总是惊讶地发现，祖父祖母们愿意为自己的孙子孙女进行改造。我家两位 92 岁的老人现在正在家里安装热电联产装置呢。尤其是工程师，他们愿意为自己的老年生活置办最好的物品。

咨询师的作用

施密特：关于节能改造的知识我们已经掌握了很多，但是还有一个问题需要解决，这就是如何将现有的知识纳入人员培训工作中去，并最终和咨询工作结合起来。我周围的人经常这样描述他们的经历：“现在我有一位暖气安装工、一位窗户安装工和一位节能咨询师，但他们总是给我完全不一样的建议。”这会让人感到非常的困惑。

库伯乐：我也觉得咨询服务是非常重要的。但是我不确定节能咨询师是否有能力给出专业性的建议。我自己做过一个实验，请了一位能源咨询师来到我家里。大家肯定不敢相信这位先生都跟我说了些什么。培训、资格认证和专门知识毫无疑问是非常重要的，因为目前的节能改造技术已经发展到非常复杂的程度。大家可以到自己家的地下室去，试着设定一下自己家的采暖设备，

你会发现 100 的智商都不够用！我们必须要注意雇用有足够资质的咨询师。当然培训和进修也非常重要，联邦经济部也正在进行这方面的努力。

听众发言（Krems 多瑙大学）： 奥地利的大多数联邦州都有采用科学手段审查改造咨询有效性的示范项目。在这些项目中，人们对节能改造咨询师进行培训，培训的领域不仅局限在能效优化上，也包括无障碍设施、抗震性能、资助法、租约法和房屋共同使用法等方面的内容，以保证这些咨询师有能力提供全面的咨询服务。对此感兴趣的人非常多，而且 Krems 多瑙大学也曾经研究过实施这些措施能带来多少 CO_2 减排量。很多人看起来对建立这样的机制很感兴趣，因为这其中不仅有道德和生态方面的原因，也有经济方面的原因。

诺伊纳尔：为了真正能够促成投资，咨询建议的约束力是非常重要的。如果给出有约束力的建议，如“如果你进行节能改造，那么可以在将来减少 30%、40% 或 70% 的燃气或燃油消耗，15 或 20 年后就可以回收投资成本。”，那么就有可能吸引很多单户房屋业主接受节能改造。

另外，还必须考虑咨询服务的性价比。一次好的、有约束力的咨询服务用 50 欧元肯定是买不到的。它的价格应该更高，这样咨询师才能更全面地思考。约束力和合适的报酬可以说是实现好而有效的咨询服务的关键所在。

福格勒：我觉得，对于能源咨询师，我们应该稍微有点耐心。因为好的能源咨询师是需要经验的。目前市场上的能源咨询师中大约 90% 从业时间不足一年。如果我们能再耐心地等上 5 年或 6 年的话，到时肯定会有经验丰富的能源咨询师。

资助咨询

雷耶茨：我觉得问题的关键点不在能源咨询，而是资助咨询。联邦经济部 在进行现场咨询的时候也进行资助咨询，这么做的确有它的道理。当时我曾经举过一个例子：我认识一位业主，他本来打算花 25000 欧元给一栋建于 1960 年的房子安装气源热泵。他本来已经同意安装了，但是又问我知不知道有没有什么资助可以申请。我是想说，这个案例中起决定作用的是资助咨询。因为很快我们就发现，这项改造的方向错了。当时我告诉他，气源热泵可以节约 50% 采暖费的说法是取决于用户行为的，所以是没有约束力的。我还告诉他，在决定采取某个单项节能改造措施之前，首先要确定总体方案。最后他没有安装气源热泵，而是进行了保温改造，安装了太阳能制热设备，这些都是真正可持续的改造措施。由于申请到德国复兴开发银行的贷款，因此他的投资总额比计划多了一倍，此外还拿到了补贴 — 这样一来，改造费用负担他就可以承受的了，并且物有所值。如果当初只靠他自己，是不会考虑到这些的。也就是说，我们必须在节能工作中向用户提供更多资助方面的信息。

国家资助

库伯乐：我想把资助可能性和用户的疑虑联系起来说。如今，联邦政府和其他资助计划的倡导者分别有不同的资助项目。在联邦环境部的一本手册中，提到了“资助丛林”一词。也许对于很多要进行节能改造的人来说，了解资助条件所要花费的时间要远远多于研究具体改造问题所花费的时间。我不认为国家应该万事一把抓。给每栋文物保护建筑都安上光伏发电板，这样做真的有意义吗？到处安装光伏设备，这样有意义吗？我觉得，光伏产业已经有了一个运转良好的市场，并且有强劲的增长势头，对于这个领域不能蛮力推进，而是应该具体情况具体分析，找出适当的解决办法。

戴默尔：但是这些资助计划的意义就在于国家希望借此实现某些目标。如果各个资助计划相互阻碍的话，那么国家或许就应该考虑一下，资助资金到底应该怎样花了！？

库伯乐：我想说，在这方面国家的确是必须认真考虑的，但是我们大家对政治也都是有一定经验的。资助计划的目的不仅仅是推动某一项事业，同时也有其它的目的，如联络客户或者地区利益等等。

听众发言（施耐德 Astrid Schneider，建筑师）：我想列举一个数字。大多数资助计划都是通过德国复兴开发银行出资的。在 2008 年夏初，政府花了 80 亿欧元的纳税款，只是用来挽救复兴开发银行的全资子公司德国工业银行（IKB），使其免于破产。这就意味着，德国花了 80 亿欧元，仅仅是为了还清美国的房贷坏账，却不把这些钱投入到我们的项目中来。与之相比：从 2000 年至 2007 年，为了将可再生能源发电在总电耗中的比例由 4% 提高到 14% 而额外支付的资金总共才不过 70 亿欧元。这 70 亿欧元并非纳税款，而是按照《可再生能源法》规定收取的电费。但是我们却花了好多年的时间来讨论我们能否负担得起可再生能源！政府所面临的问题是，怎样把纳税人的钱花在刀刃上。

能源证书

听众发言：引入能源护照是为了让租户能够更好地了解住宅市场。我在想，能不能进一步扩大能源护照的适用范围，并使这套机制能够在实践中真正发挥作用，从而也为住宅建设公司提供一份保障。

雷耶茨：我觉得就目前来说，能源证书还很难发挥积极作用，但是以后是可以的。大家都知道，从 2009 年开始，既有建筑就将必须出具有关能源需求的能源证书，从那时起，能源证书就能真正发挥积极作用了。它可以给出譬如一栋房屋的建筑物理特性和技术设备特性这样的关键性信息。我想到那时，您提出的问题有望会得到令人满意的答案。

福格勒：作为投资依据的话，只有以能源需求为基础的能源证书是不够的。投资者需要详细周到的能源咨询服务，而能源证书只能给出粗略的信息。所以我们告诉我们的住宅公司，仅凭能源证书他们是得不到信息的，他们所需要的是能源咨询。既然已经投了几百万，那么也应该花上几千欧元做一套科学的能源方案，在这方面能源证书是不起作用的。

不过我认为以能耗为基础的能源证书却有些不同。虽然它对改造也起不到什么作用，但我们可以通过它对建筑物的能耗概况有一个很好的全面了解。

改造要有章可循

雷耶茨：“按方案进行改造”本来是能源证书制度最为关键的地方。因为改造并不是说“随便从哪儿开始”都可以。所以我还是举气源热泵的例子。如果有了改造方案，我根本不会赞同花 25000 欧元去安装气源热泵，而事先却根本没有创造高效运行热泵的前提条件。如果这位业主按照改造方案进行改造，多投资 5000 欧元，这样热泵用了又对房屋进行全面改造，最终获得了 80% 的节能量。

施密特：在调节系统方面，也应该注意系统间的相互关联。这点是非常重要的。如果我知道我的采暖锅炉要安装调节装置，但是锅炉调节系统却无法和太阳能设备的调节装置实现联动，那么这一切又有什么用呢？ 整合的部件越多，系统就越复杂。我们需要测量 — 调节 — 监控（MSR）系统，不仅是出于实际操作的考虑，而且还要实现建筑技术装备与建筑物理性能的良好配合。

研究需求

施密特：我们应该对哪些方面加强研究呢？如果对更大规模的相互关联进行更多考虑的话，就有可能提高节能量和效率。也就是说，不仅要考虑单个构件或者单栋建筑，而是要针对各种建筑结构，设定不同的用户特征。

首先可以研究一下新型改造技术：“必须总是要逐项进行改造吗？”首先做各个建筑部件的保温改造，接下来可能还要更换技术设备；难道就不能按照模块化的方式进行改造吗？我在想，可不可以在改造时采用大型多功能构件，这样就可以一次同时实现多项功能。另外，高度工业化的预制产品和相应的措施也会为改造成功提供保障。这样，由同一厂家提供技术和构件并实现连接，就减少许多不确定的因素。

雷耶茨：遗憾的是，身为建筑师我想说，依然有许多同行对旧建筑并不感兴趣，虽然大多数同行都在靠旧建筑改造赚钱！目标是“翻修既有建筑”。其实在整个使用期间，建筑物一直都在被不断翻修。所以我们就应该思考一下：怎样根据现代人的需求对既有房屋进行翻修。但这方面存在一个很大的障碍。有时我们根本没有弄明白建筑物的复杂性，不了解这种复杂性是如何产生的。为了弥补相关各方意识上的不足，我们应该研究分析一些对复杂的旧建筑进行改造的案例及其改造方案。所以，我们在建筑师以及工程师和手工工人的培训和进修方面需要支持。这也可以作为研究的目标之一。

比如，我们需要加强对既有建筑的创新研究。这方面联邦建设部应该做出一些努力。另外，我们必须把侧重点放在使用创新技术、材料、建筑结构和楼宇技术上。

听众发言：问题是，最需要研究的是哪些方面呢？看一下统计数字可以发现，最具有潜力的是热力和供暖领域。我觉得大学、高等专科学校以及其它技术培训机构有在这方面可以大有作为，必须鼓励他们行动起来。

库伯乐：我很高兴，您刚才所说的其实和我们的研究促进方案不谋而合。我们现在都在依靠联合研究，大学、高专、多家弗劳恩霍夫研究所和经济界之间都有合作。我们已经研究了很多单项技术，现在关键就要看能否将这些单项技术组合起来形成一个系统。您说的很有道理。正因为这个原因，我们才想通过示范项目，其中包括测量研究和附带研究课题，希望通过实践来证明这样的系统能否真正发挥作用。我们希望从中发现错误，吸取教训，不断改进。

降低成本和学习曲线

诺伊纳尔： Schott Solar 既是一家光伏设备生产厂家，同时也建造大型热电厂。我们光伏发电行业的一个首要目标就是降低成本！我们必须尽快实现 grid parity（即太阳发电成本下降至与传统发电成本相当）。而这只有通过扩大电池容量才能实现，目前我们正在整合不同组件的电池容量。也就是说，客户从我们手中得到的光伏组件是用于系统安装的，其中有 90% 用于建筑物，大多安装在斜屋顶上，不过也有安装在平屋顶和草坪上的。对我们而言，《可再生能源法》是降低电容扩充成本的必要前提条件。虽然这是很大的挑战，但我们还是能够做到的。《可再生能源法》使得光伏设备的投资者 — 也就是最终用户 — 可以在 20 年内以 5% 到 6% 的年回报率收回投资成本。按照《可再生能源法》的规定，每千瓦时的收益率会逐年大幅下降。我们必须遵守《可再生能源法》规定的递减率。

听众发言（内斯特勒博士，太阳能能源供给技术研究所 ISET）：在光伏发电领域，经常能见到人们用学习曲线来描述成本降低的实际情况。我的问题是，建筑节能改造领域是不是也有类似的曲线呢？也就是说，有没有学习曲线或数据，从中可以看出在采用相应技术之后，实际上能减低多少成本呢？如果没有的话，问题出在哪呢？

雷耶茨：绘制建筑节能改造的学习曲线是非常困难的。在这方面我们还处于起步阶段。我们一直在对能源咨询师进行培训，各个班也一直都是报满的。每年都有 1200 至 1500 名咨询师来参加培训。作为建筑师，我们的经验是：现代化改造一定要有改造方案。如果不这样做，而是仅仅依靠工匠给出所谓的随机咨询建议， 那就没有学习曲线可言了，因为只会实施单项改造措施。巴符州就犯过这样的错误。而我们需要的是全面咨询：只有这样，我们才可能有一天记录下学习曲线。

优化、评估和智能测量

听众发言：做完保温改造后，如果再进行优化、评估和智能测量（MSR），那么 还可以将能源需求再降低一半！如果光伏设备运转不正常的话，运营方最迟也会在当月月底发觉。但如果是太阳能热水器的话，运营方可能永远也发现不了。所以，资助项目应当特别重视这方面的工作，这样我们才能得到测量数据，才能知道哪里运行正常，哪里出现了哪些问题。

施密特：我认为 MSR 是非常重要的。弗劳恩霍夫建筑物理研究所也做过一些建筑工程项目，结果发现大多数建筑的结果并非是人们想要的，有时还产生了不一样的效果。如果在工作中考虑再周密一些，就能改进许多。讲到这里，我们就又回到培训和咨询这个话题。企业都面临着成本压力，因此在对装配工人进行培训时，都会力求简洁明了，如单纯告诉他们 3 号白盒子总是安装在某条电线的某个位置上。所以示范是非常重要的，目的就是要告诉大家，除了上述情况以外还可以做些什么，以及哪些方面具有改进的潜力。同时，还必须转回头把这些知识植入到培训、进修以及最终的咨询工作中去。

库伯乐：16 年前，我安装了一台太阳能生活用水热水器，当时还配了热量表。通过热量表，我发现太阳能热水器在很长一段时间内都无法正常工作。之后我就找到了在部里负责制定资助指令的几位同事，建议他们应该把安装热量表写入指令，作为获得资助的必要条件。这引起了业内的强烈反响，很多人都说加热量表的做法行不通，因为得热量在很大程度上与消耗量相关。所以他们达成一致意见，决定安装功能监控仪。但这并不是我所理解的测量。

福格勒：通过 MSR ，人们几乎可以将所有房屋的采暖设备和热水制备的效率再提高 10% 至 15%。在安装太阳能热水器时，必须同时安装长期功能监控装置和热量表，以便控制得热量。这虽然会增加一些成本，但如果设备运行出现故障的话，可以及时发现。

另一个讨论的热门话题是智能计量（smart metering），即分室调节。在这方面有很多不同的经验可以供我们参考。在有些案例中，通过分室调节并不能达到节能的效果，因为调节系统过于复杂，租户根本不用它，结果最终测量到的始终都是设定值。但在那些用户确实使用了分室调节的案例中，都达到了节能的效果。但是每套住宅的成本高达 1000 至 1500 欧元，对于大面积推广来说还是太贵了。因此就对行业提出了降低造价的要求。如果造价能降低到每套住宅 500 欧元左右的话，大家普遍都能负担得起，那么分室调节系统就会很受欢迎。

听众发言（迪施 Disch 先生，建筑师）：我想说的是，大多数建筑物调节系统的设置都是错的，因为没人搞得明白。坦白地讲，我自己也对调节系统一窍不通，即便去请教专业人员，他们也不清楚。所以在这方面还需要研发人员做出很大的努力。

单户房屋和多层住宅楼的不同之处

福格勒：节能改造工作为什么会止步不前呢？谈到这里，我们必须把多层住宅楼和单户房屋以及新联邦州和老联邦州区分开来：新联邦州的多层住宅楼有 70% 已经进行了节能改造，其中 50% 是全面节能改造，就是说，每两套住宅中就有一套做了保温。这与大多数预制板居住建筑归住宅公司所有有很大关系。从建筑技术角度来看，这些建筑很容易进行改造和改建，并且在 90 年代也都完成了改造。住宅区应该继续迎合市场需求，保持良好的宜居性，这方面也得到了各种资助计划的支持。在全国范围内，德国住宅和房地产企业联合会（GdW）所属住宅中，一半以上都进行了节能改造（30% 是全面节能改造，20% 是部分节能改造）。但是老联邦州的改造速度还没有这么快。

雷耶茨：的确如此，我们必须把多层住宅楼和单户房屋区分开来。德国有 1900 万栋居住建筑，其中 1500 万栋是单户或双户房屋，但这部分住户的人数只占总人口的 40%。另外德国西部地区 60% 的人口住在多层住宅楼中，这个比例在东部地区为 80%。单户或双户房屋大多为产权人自住，在这方面我们进展得很顺利。但是至少同等重要的是：要找到私人融资的多层住宅楼的解决方案。

住宅公司的特殊条件

1、融资

福格勒：住宅公司面临着经济效益的问题。公众和学术界对改造进行经济性计算时都是按照投资者自用的模式进行的，即谁为节能改造投资，节能收益就归谁。考虑了能源价格上涨因素后，投资回报期通常为 20 年。但是住宅公司却不能这样计算。一家住宅公司为一栋住宅楼及其节能措施投资，作为回报，他可以提高租金。但是如果他想收回成本的话，提高的租金必须多于租户所节省的能源费用。从德国全国来说，多层住宅楼的平均运行费用为 1 欧元，冷租金为 4.5 欧元。如果按照现行标准进行改造的话，或许能够节省 50 到 80 欧分的能源费用。但是租金却必须提高 1 欧元以上，也就是说，租户要付的暖房租更高了。保持暖租金不变是非常重要的，如果能够实现这一点，那么就会大大推动现代化改造工作。不过目前我们还没有做到这一点。除此之外，住宅公司只能把每平方米 200 欧元节能改造成本中的 100 欧元通过提高租金的方式来偿还，剩下的是建筑维护成本，必须动用其它资金来偿还。

将既有建筑改造为低能耗建筑的投资成本可达到每平米 300 至 400 欧元，而改造为被动房的成本更高，可达每平米 600 欧元。因此投资回报已经成了一个必须克服的瓶颈。

建筑改造的技术可行性与经济可行性之间存在很大差距。除此之外，建筑物的投资周期是最长的。一辆汽车可以使用 6 年就被换掉，一台冰箱需要 8 或 10 年，但是一栋改造完的建筑必须再使用 20 年才能收回投资，其成本要远远高于其它行业。根据我们的计算，要想减排一吨 CO2 的话，住宅公司需要投资 6000 欧元。即使按照 20 年计算，每年的成本仍有 300 欧元。而工业企业的减排成本却只有 25 欧元 / 吨。由此看来，建筑节能改造的投资成本还是很高的。

由于存在这种差距，因此建筑物的产权人在对建筑物进行改造的时候，往往不会把能用的技术措施都用上，而是必须考虑建筑物的市场前景还有多久。这就使他们在选择改造标准时心存疑虑。即使立法者提高法律标准，也于事无补，而只会进一步增加改造成本。现代化节能改造只有在有融资、有市场的情况下才会变得简单起来。

2. 住宅公司与光伏设备

福格勒：许多住宅公司愿意使用光伏设备，但却因为税的问题而不能安装。安装光伏设备只有通过发电入网才能收回投资，但是入网所得要算作营业收入。一些被减免税务的住宅公司在取得了这项营业收入以后就会失去税务优惠。也就是说，他们可能根据《可再生能源法》获得了 10000 欧元的入网收入，但另一方面却必须缴纳 200 万欧元的税款。在这种情况下，许多企业就放弃了光伏发电。

听众向福格勒女士的提问：我的问题是：如果由于运营光伏设备属于商业活动而不能由公益性住宅公司来进行的话，那么您是否觉得可以由大型的光伏设备运营公司来做？

福格勒：可以的，一些住宅公司正在考虑向外出租屋面。但是前提是他们乐意承担第三方在屋面上安装光伏设备所带来的所有风险，虽然每平米的租金只有 1 欧元。这需要制定非常详尽的合同，明确风险和责任。但目前人们也在考虑这种做法。

3. 文物保护

福格勒：文物保护机构非常重视维护原有状态，比如外饰面必须保留，可是这样一来就无法

进行外保温了。在柏林这很成问题。那里有很多受保护的战后现代风格的文物建筑，其实大家根本不明白到底为什么不能对这些建筑进行外保温改造。同样，给文物建筑安装塑钢窗也是非常困难的。一方面我们能够理解文物保护者的苦衷，另一方面，其实现在的塑钢窗在窗框和外观上并不比木窗差多少。我这里说的并不是城堡或某些优秀建筑，而是大量需要翻新以便继续使用的建筑。

展望

戴默尔：谢谢大家的积极发言。根据联合国环境规划署的研究，全球建筑领域 CO_2 减排的潜力为 18 亿吨，因此在这个方面采取措施是很有必要的。