

1.9.2 气密性建筑的防护作用

室外空气有害物质是如何进入到室内的？在现场测试、实验室试验和模拟计算中经常遇到这个问题。可惜许多关于 I/A 的文章根本没有或者只是附带讨论了气密性问题，而且大多没有换气次数数据。尽管如此，我们今天可以列出一系列有害物质，证明它们对于人类健康的影响，并且对 I/A 或者建筑物防护作用作出判断。

欧洲理事会 1996 年 9 月 27 日颁布的指令 96/62/EG (1996 年公报第 L296 号，第 55-63 页) 为欧洲范围统一评价和监督室外空气质量奠定了基础。指令规定，将由欧盟委员会对二氧化硫、二氧化氮、细颗粒物、浮尘、铅和臭氧（初始阶段），以及一氧化碳、多环芳香属碳氢化合物（PAK — 苯并（a）芘的主要成分）、镉、砷、镍和汞制定相关规定。在欧共体区域，将全面规定统一的极限值（必要时包括偏差范围）、目标值、长期目标或报警阈值（2006 年联邦环境监督局）。

联邦环境监督局公布的 2003 年德国空气质量评价报告表明，二氧化氮、细粉尘和苯超过了包括偏差范围在内的极限值。最严重的是在不利空间条件和气象条件下的污染物浓度峰值。图 1.9.1 给出了 2003 年德国细粉尘的浓度值。表内列出的是空气动力直径 PM_{10} 每小时最大平均值。只有 3 个测量站的日平均值未超标（1%），85.6% 的监测站达到了 $100 \mu g / m^3$ ，44.1% 的监测站超过

$200 \mu g / m^3$ ，9% 的站点超过了 $500 \mu g / m^3$ 。测出的每小时最大平均值达 $1941.5 \mu g / m^3$ 。主要由燃烧过程（交通、工业）产生的二氧化氮，也超过了 2010 年生效的 $200 \mu g / m^3$ 极限值（图 1.9.2）

下面将介绍科学文献公布的一些在室外空气中浓度较高的污染物的 I/A 系数与建筑物外围护结构气密性的关系。从表 1.9.1 可以看到

相应的抽样数量。需要注意的是，对建筑物气密性—不密封/密封/无数据—的划分原则上依据定性数据而不是定量数据，因为在引用的文章中经常缺少具体的换气次数和关于用户通风方式的阐述。这里还需要指出与参考文献有关的其他不确定性：不是经常能找到关于所研究的某种有害物质的室内来源。这有可能导致 I/A 系数偏高，进而弱化了建筑物气密性的防护作用。

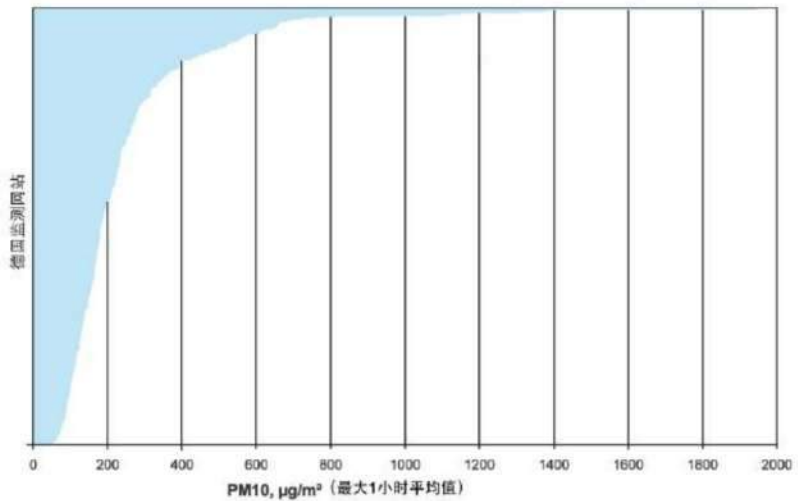


图 1.9.1: 2003 年德国环境质量检测网点测到的每小时 PM_{10} 最大浓度。

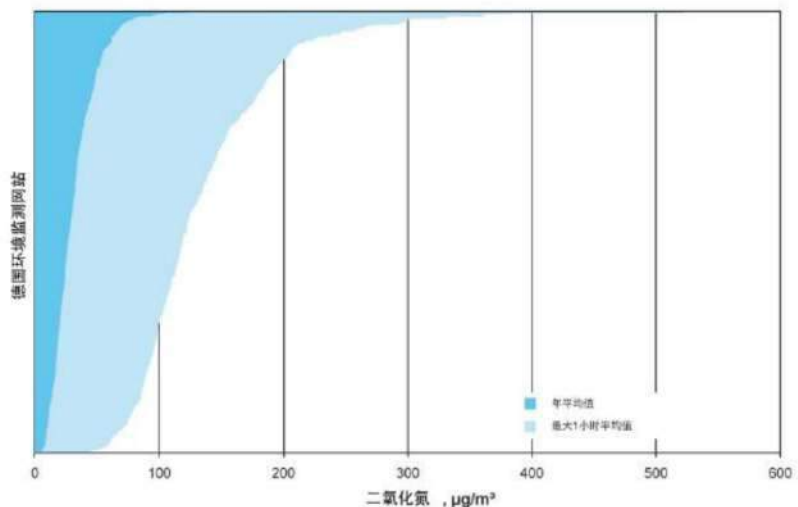


图 1.9.2: 2006 年德国环境质量检测网点测到的二氧化氮年平均值和每小时最大浓度。

1. 提高建筑物外围护结构气密性的原因

表 1.9.1 从参考文献查得的 I/A 系数抽样数量、总量和按建筑物外围护结构气密性分类的数据，数据来源于参考文献。

有害物质	建筑物外围护结构			总计
	不密封	密封	无数据	
臭氧	11	9	304	324
PM ₁₀	-	-	937	937
PM _{2.5}	56	21	1448	1525
花粉	19	19	43	81
花粉过敏物	28	26	-	54
霉菌孢子	21	29	187	248
二氧化氮	64	51	209	324

1.9.2.1 细粉尘

室外空气对室内空气细粉尘浓度的贡献受到复杂因素的影响。除了建筑物外围护结构的气密性，许多因素如通风行为、室内粉尘沉积、楼层和建筑物内的气流工况都有重要影响（弗鲁姆（Fromme）等，2007）。如果室内缺少粉尘生成过程——主要是吸烟、炊事（主要是煎炸）和室内人员的一般生理活动，那么室内粉尘浓度显然受到室外空气的影响。据恺姆（Kim）等人的报道，根据换气次数，室外空气占室内污染物浓度的比例在 5-90%之间波动。此外，也可以认为，相比于大颗粒粉尘，室外空气中小颗粒粉尘对室内环境影响更大。西鲁斯（Cyrus）等对两个模型房间进行测试发现，室内粉尘污染中 PM_{2.5} 占 75%，而 PM₁₀ 只占 43%，从而证明了上述判断是正确的。

尽管细粉尘对人体健康的影响是无可争议的，但在科学文献中只能找到很少室内/室外浓度比较的资料。比如，对于 PM₁₀ 就找不到换气次数和建筑物外围护结构气密性影响的相关资料。从

文献查得的 937 个数据得出的平均值为 $I/A=0.76$ ，25% 为 0.65，75% 为 0.91。图 1.9.3 表明气密性好的建筑物外围护结构对于 PM_{2.5} 有明显防护作用，此时 I/A 平均系数为 0.63。与此相比，围护结构不密封时，I/A 平均值在 0.83。如果将粉尘浓度减少 25%，可以显著减少家住繁忙交通道路附近居民的危害。建议以后多做一些在实际居住条件下粉尘影响的测量，以便获得经得起医学考验的数据。

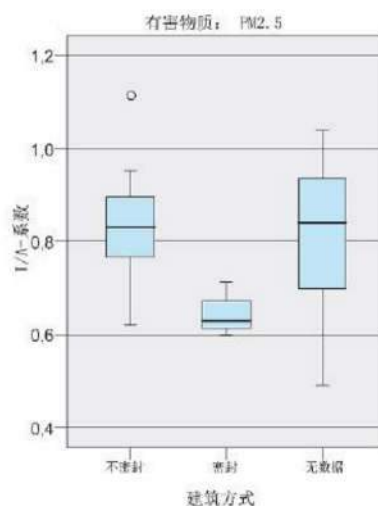


图 1.9.3: 室内外粉尘浓度与建筑气密性的关系（方框表示 25%-75% 的统计数据区间，方框内的横线表示 50% 的数据对应的情况，方框外上下两根水平短线表示涵盖不含极端数据的总数据范围。）

1.9.2.2 二氧化氮

对室内规定二氧化氮周平均值 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为基准值 II（需要采取措施的基准值，安乐特（Englert））。从 419 个德国监测站测得的二氧化氮浓度计算出连续的周平均值，从而计算出超过基准值 II 浓度的比例，最后得出如下结果：2006 年有 50% 的站点测出室外空气二氧化氮浓度超过基准值，1/6 站点超标 10%，43 个站点超标 90%。图 1.9.4 表明，市中心交通繁忙区域是重灾区。在交通繁忙的 152 个站点中，只有 28 个站点（18.4%）未超标。2006 年 1/5 站点有 6 个多月浓度超过 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。上述实测数据表明，建筑物采用自由通风时，污染严重地区的室内环境基准值很有可能超标。近年来传染病学研究发现，与居住在污染少的安静小区的居民相比，居住在交通繁忙区域的居民患呼吸道和心血管疾病的几率要高。除了二氧化氮，致病污染物还包括细粉尘和噪声污染。

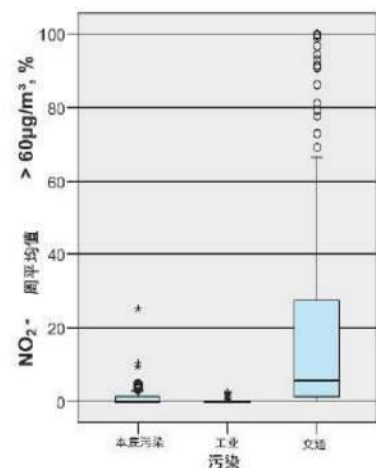


图 1.9.4: 超过德国监测站二氧化氮周平均值 $60\mu\text{g}/\text{M}^3$ 的百分比占比与当地污染负荷的关系。

围护结构对防止居室受到室外空气二氧化氮污染有什么作用呢？图 1.9.5 列出了根据科学文献计算出的 I/A 系数。可以看到，气密性好的建筑物外围护结构有很高的保护作用，I/A 平均值在 0.26。对相对较大的样板量 (n = 209) 统计得出的 I/A 平均值为 0.65。这些抽样没有换气次数和建筑物气密性的相关数据。在围护结构气密性差、因而换气次数很大的建筑物上，I/A 为 1.09，超过了 1。说明除了来自室外的二氧化氮，也存在室内污染源（燃气、吸烟）。

1.9.2.3 臭氧

2010 年前，一直努力将臭氧浓度 8 小时平均值控制在小于 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在 3 年平均值中，每年允许有 25 个日历日超标。而在 2007 年仍有 1/4 监测站的数据超标。对于臭氧 I/A 系数的研究表明，自然通风房间的 I/A 系数在 0.7 和小于 0.05 之间。分析发现，气密性好的围护结构有很高的防护作用

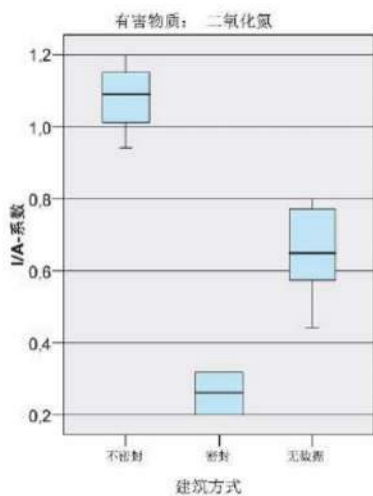


图 1.9.5: 室内外二氧化氮浓度与建筑气密性的关系。

(图 1.9.6)。这里不仅是因为减少了渗风，具有很高反应能力的臭氧在与室内物质接触时也会得到降解。科希纳 (Kirchner) 在其他条件相同的情况下，在一个没有吸附物质的居室测得 I/A 值为 0.2。在放进吸音毡后，该系数降低到 0.05。

1.9.2.4 花粉和霉菌孢子

房间里生物性有害物质中，花粉和霉菌孢子一般是从室外通过渗风进入室内的。而细菌、病毒和螨虫主要是在室内滋生的。假定室内没有污染源，具体说没有霉菌生长的条件或没有产生花粉的植物，那么密闭的建筑围护结构可以保护居民不被暴露在污染物环境中。无论对于花粉和花粉过敏物质 (图 1.9.7 和 1.9.8)，还是对于霉菌孢子，这种保护作用都得到了科学文献资料的证实。在换气次数小的情况下，花粉过敏物和霉菌孢子的 I/A 系数中位值为 0.25；而对大颗粒花粉的防护作用更明显，I/A 平均值为 0.03。

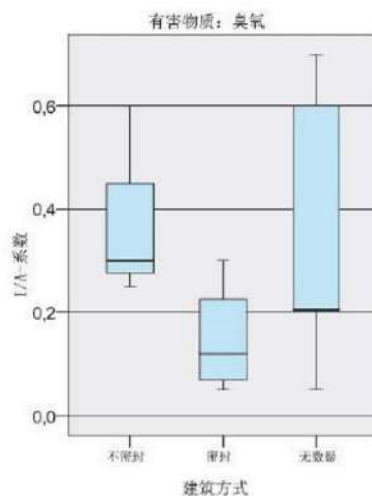


图 1.9.6: 室内外臭氧浓度与建筑外围护结构气密性的关系。

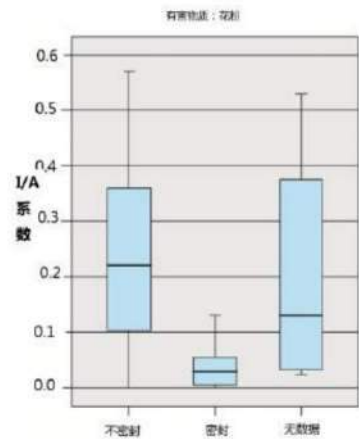


图 1.9.7: 室内外花粉浓度与建筑外围护结构气密性的关系。

即使提高换气次数，上述有害物质的 I/A 中位值还是比较低，花粉为 0.22，花粉过敏物为 0.36，霉菌孢子为 0.40。对于敏感人群，通过密封围护结构减少在有害物质中暴露的可能，无疑是一项重要的预防措施。气密性好的外围护结构不仅可以减少应时污染，也可以减少季节性过敏物质进入室内的几率，从而减少二次飘尘的可能。

1.9.2.5 氡

在主要由室外进入室内的有害物质中，氡占有特殊地位。土壤气体是室内污染的最重要来源。表 1.9.2 列出了居室氡浓度的不同来源所占份额。根据世界卫生组织 (WHO, 2005) 公布的数据，室外空气中氡平均浓度为 5-15 Bq/m³，全球平均室内浓度为 39 Bq/m³。德国从 5152 个家庭系统性采集了氡测量值 (肯斯基 (Kemski) 等, 2004)。作者给出的几何 (算术) 平均值为: 地下

1. 提高建筑物外围护结构气密性的原因

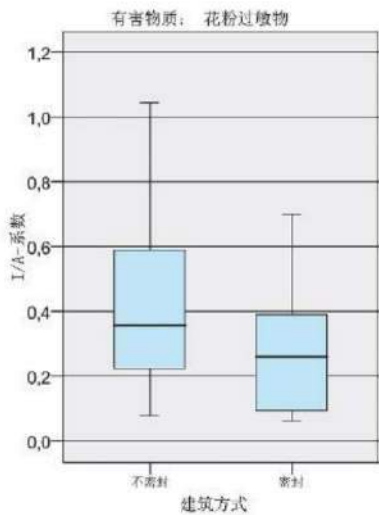


图 1.9.8: 室内外花粉过敏物浓度与建筑外围护结构气密性的关系。

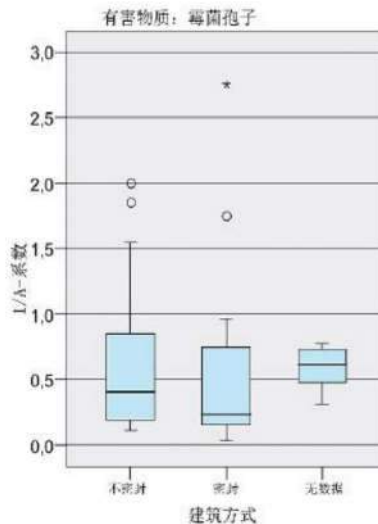


图 1.9.9: 室内外空气霉菌孢子浓度与建筑外围护结构气密性的关系。

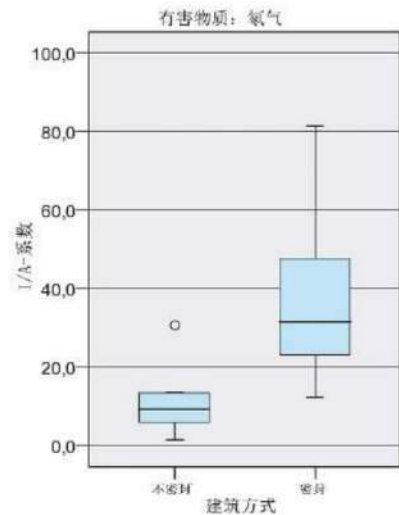


图 1.9.10: 室内外空气氡浓度与建筑外围护结构气密性的关系。

室浓度 $90 (182) \text{ Bq/m}^3$ ，底层居室 $61 (111) \text{ Bq/m}^3$ ，二楼居室 $50 (68) \text{ Bq/m}^3$ 。有 27.9% 的测量居室氡浓度超过 200 Bq/m^3 ，12.7% 的居室超过 400 Bq/m^3 。在地质氡含量高的几个联邦州（图林根，萨克森），有 5.2% 和 5.3% 的地下室氡浓度超过 1000 Bq/m^3 。

今天，氡被认为是引发支气管癌的重要诱因。欧洲、北美和中国的流行病学研究表明，有 6~15% 的肺癌患者归因于氡污染。氡浓度每增加 100 Bq/m^3 ，患肺癌风险增加 10~16%。75 岁不吸烟人群在氡浓度为 0、100 和 400 Bq/m^3 时肺癌发病率分别为 4、5 和 7%。而受到上述污染的吸烟人群肺癌发病率则增加到 100、120 和 160%（WHO, 2005）。目前世界范围推荐的基准值为 $150 \sim 400 \text{ Bq/m}^3$ 。欧共体理事会于 1990 年也建议在现有居室氡年平均浓度超过 400 Bq/m^3 时应采取措施。新建建筑设计值不允许超过 200 Bq/m^3 。最近的研究证明氡浓度在 $100 \sim 199 \text{ Bq/m}^3$ 时，不吸烟人群发病危险就已经会显著增加。为此，德国联

邦环境、核安全和自然保护部（BMU）建议将居室氡浓度目标值定为 100 Bq/m^3 。超过该浓度时应该采取降低氡污染的措施（匿名，2007）。

鉴于氡对人体健康有重要影响，查找对于氡暴露的主要影响因素就显得非常重要。关于气密性对氡浓度的影响应根据其来源分别予以研究：在来源主要为“土壤气体”的位置，提高气密性和采取排出氡的辅助措施可

以有效防止居室出现高的氡浓度。显著减少室外空气进入室内的体积流量，在家里无人和污染不严重时是完全合理的，而且为了节能也应该这样做。但这可能会导致室内氡浓度升高。图 1.9.10 给出了氡的 I/A 系数，它是根据科学文献发表的室内浓度计算出来的。高换气次数建筑物的平均值为 9.4，气密性较好的围护结构平均值为 31.6，这明显反映了典型的氡污染条件（也可参见表 1.9.2）。

表 1.9.2: 居室氡的不同来源，摘自匿名资料，2001

氡来源	居室氡浓度, Bq/m^3	
	一般范围	最高
地坑	10-2000	<30000
建材	<10-200	<2000
环境空气	5-80	<1000
水	<10	<100

1. 提高建筑物外围护结构气密性的原因

由于文献大多给出的是当地室外浓度，在计算时采用了平均浓度 $10\text{Bq}/\text{m}^3$ (WHO, 2005)。如表 1.9.3 所示，特别在一些地质氡浓度很高的地区，在提高建筑物气密性的同时，必须采取辅助措施限制氡污染。与氡进入室内有关的建筑物结构特性会导致明显的污染浓度差异。提高气密性首先意味着预防氡污染，也就是通过采取密封措施防止这类有害物质进入居室。

1.9.3 对于气密性建筑内污染物排放性能的要求

通过引用佩滕科费尔关于“为粪堆通风”的名言，上文已经对具体要求做了详细描述，也就是只有新陈代谢和人类活动排放的污染物才允许成为对室内环境污染的主要来源。因此，重要的排放物就是湿气、人体排出的微生物和有机与无机气体。对于所有归咎于人体新陈代谢的污染物，在今天仍然采用佩滕科费尔指数 (PET) 作为评价指标。佩滕科费尔要求，室内二氧化碳浓度不得超过 1000 ppm ，原因很令人信服：“在房间内存在其

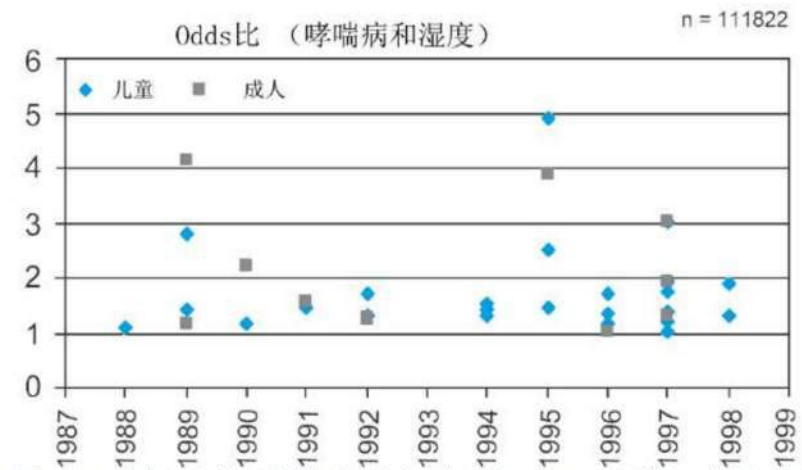


图 1.9.11 在高湿度房间居住人群罹患哮喘疾病的风险 (OR 比值比) 与低湿度房间的比较 (在 1988-1998 年时间段开展流行病学研究得出的结果, 博纳哈格等, 2001)。

他碳酸排放源的前提下，室内空气碳酸含量的增加可以用来衡量现有的空气已经有多少存在于房间内人体的肺里。空气参与的所有其他功能基本上与呼吸相并行。”居室内二氧化碳浓度不超过 1000 ppm 的要求与建筑物气密性无关。遵守这个数值可以保证人类活动产生的排放物能够被充分地排出。

1.9.3.1 空气湿度

目前，全世界已公认居室内的湿气是危害人体健康的一个重要因素。对科学文

献 (博纳哈格 (Bornehag) 等, 2001) 的综合分析证明，在湿气重的房间里居住会提高发病率。在高湿度的房间里经常出现的疾病主要有过敏和炎症。图 1.9.11 通过潮湿房间与不潮湿房间的比较，反映了流行病学研究得出的在潮湿房间居住罹患哮喘疾病的风险 (OR 比值比³)。

2001 年，德国有 21.9% 的住宅存在肉眼可见的潮气损伤，有 9.3% 的住宅有霉变 (布拉西 (Brasche) 等, 2003)。利用这份对联邦德国 5530 套住宅调查得出的对德国有代表性的数据，来分析建筑物气密性对空气湿度的影响，得出了如下结论：在门窗有环绕密封的住宅，出现潮气损伤的概率为 19.3%，而其他住宅为 24.6%；结露霉变的概率分别为 7.9% 和 10.6%。这两种情况的差异是很大的。对其他影响和干扰

表 1.9.3: 底层居室氡浓度与建筑物不同结构特性的关系, 克林格尔 (Klingel), 2008

建筑结构特性	氡浓度几何平均值, Bq/m^3 (测量值数目 n)	
	是	否
地下室保温	45 (2.021)	59 (5.108)
地下室防潮	45 (4.759)	80 (2.001)
建设年代 1960 年前	46 (5.525)	82 (3.208)
全地下	47 (6.273)	96 (2.573)
气密性地下室顶板	46 (4.822)	86 (794)

³OR 比值比对于发病率很低的疾病是表示危险度的精确估计值。OR 值等于 1 表示该因素对疾病发生不起作用；OR 值大于 1 表示该因素是危险因素；OR 值小于 1 表示该因素是保护因素—译者注

1. 提高建筑物外围护结构气密性的原因

因素例如湿气侵入、住户开窗通风、住宅产权、新风系统等研究的结果同样证明，围护结构气密性好的住宅对湿气侵害和结露霉变有预防作用。

作者们把这种因素解读为现代建筑状态的结果，它代表了大多数同类建筑的特点。从对 31836 套住宅和功能房间进行综合研究的结果表明：不密封的建筑物外围护结构不能防止结露霉变和潮气损伤。这与某些专业文献认为气密性好的窗户是居室结露霉变罪魁祸首的论点相矛盾。

关键是要创造一种不受高湿气危害的健康居住环境，也就是应该及时排出人类在居室内活动时释放的湿气。遵守佩滕科费尔准则，一般就可以满足这个要求。

1.9.3.2 生物气溶胶

细菌和病毒在室外空气中的浓度一般是很低的，因为这种潜在致病生物原则上

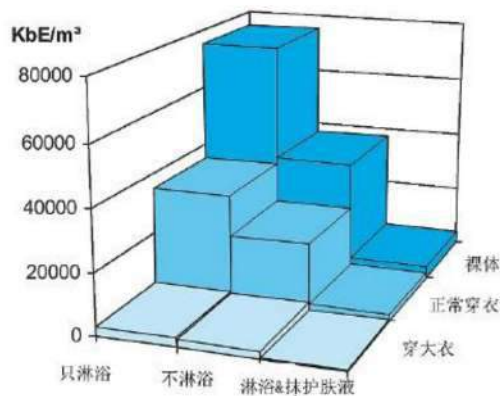


图1.9.12: 一个人在穿不同衣服和使用不同护肤品时对环境卫生空气产生的细菌污染, 用每 m³ 菌落数表示 (KbE)。

来自于人类或动物。图 9.1.12 以密闭空间的测量为例, 展示了人体皮肤和黏膜释放菌体的过程以及衣服和护肤品对于菌体释放的影响。

室内生成菌落浓度与换气次数有关, 并可以通过 CO₂ 浓度预测 (鲁德内克 (Rudnick) & 密尔顿 (Milton), 2003)。当房间里有一个可通过空气传染的炎症病人时, 随着 CO₂ 浓度增加, 同一个房间里健康人患病的风险会增加。根据病原体的传染性得出图 1.9.13 的关系。当人体获得的室外空气体积流量较大时, 室内人员被致病性菌落感染的危险降低。特别是人员密度大的房间 (会议室、学校、剧院等) 和人员经常变换的地方, 适当提高通风强度可以预防通过空气传播的疾病。

1.9.4 总结和结论

气密性好的建筑物外围护结构可以保护室内人员免受室外空气中典型有害物质

的侵害。这里首先是花粉和霉菌孢子, 它们在某些季节浓度会非常高。对于在室内会临时出现浓度峰值的二氧化氮和臭氧, 提高气密性也是一项重要的预防手段。对于由室外空气造成的室内细粉尘污染, 提高建筑物气密性的防护效果较小, 但仍然非常明显。对于此处考察的所有有害物质, 特别是细粉尘需要指出, 利用现有的 I/A 数据分析与建筑物气密性的关系还不很可靠, 应该继续开展有针对性的研究。

气密性好的建筑物外围护结构绝对不允许导致居室住户通风不良。遵守佩滕科费尔 1000 ppm CO₂ 浓度极限值可以在正常情况下保证及时排出室内湿气, 减少感染风险。应该尽量减少不是直接由人类及其活动产生的有害物质。特别是致癌性氡, 在地质氡浓度较高的地区, 应该采取适当的建筑措施尽可能减少氡进入室内。

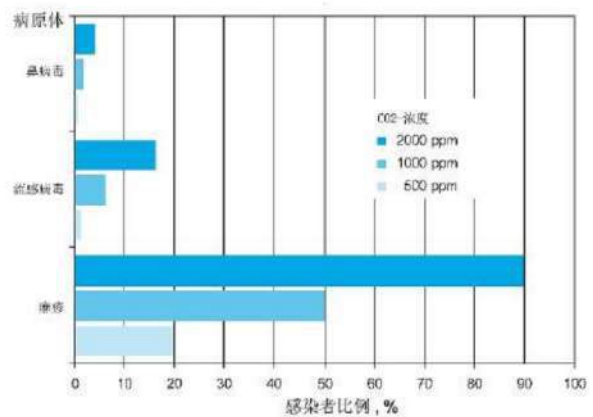


图 1.9.13: 在有病人的房间里停留时, 被三种具有不同感染性的、可通过空气传播的病原体感染的危险与换气次数的关系 (CO₂ 浓度)。

作者



奥尔夫·冈·比晓夫
医学博士，工学博士
弗里德里希-席勒耶那大学
医学院卫生与环境医学老师

参考文献（文字）

Alzona J, Cohen B, Rudolph H, Jow H, Frohliger J: Indoor-outdoor relationships for airborne particulate matter of outdoor origin. Atmos Environ, 1979, 13, 55-60.

Anonymus: Radon in Wohnhäusern: Unterschätzte Krebsgefahr. FLUGS Fachinformationsdienst, München, 7/2007.

Anonymus: Radon-Handbuch Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit & Bundesamt für Strahlenschutz, Bonn und Salzgitter, September 2001.

Bornehag C, Blomquist G, Gyntelberg F, Jarvholm B, Malmberg P, Nordvall L, Nielsen A, Pershagen G, Sundell J: Dampness in buildings and health. IndoorAir, 2001, 11, 72-86.

Brasche S, Heinz E, Hartmann T, Richter W, Bischof W: Vorkommen, Ursachen und gesundheitliche Aspekte von Feuchteschäden in Wohnungen - Ergebnisse einer repräsentativen Wohnungsstudie in Deutschland. Bundesgesundheitsblatt, 2003, 46, 683-693.

Brown-Sequard, d' Arsonval: Remarques sur la valeur des faits qui nous ont servi à démontrer la toxicité de l'air expiré. Comp Rend Soc Biol, 1888, 99-104.

Englert N: Richtwerte für die Innenraumluft: Stickstoffdioxid. Bundesgesundheitsblatt, 1998, 9-12.

Europäische Kommission: 90/143/Eura-tom: Empfehlung der Kommission vom 21. Februar 1990 zum Schutz der Bevölkerung vor Radonexposition innerhalb von Gebäuden, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 80/26 vom 27.03.90.

Friedberger E: Untersuchungen über Wohnungsverhältnisse, insbesondere über Kleinwohnungen und deren Mieter in Greifswald. Fischer, Jena, 1923.

Fromme H, Gabrio T, Lahrz T, Dietrich S, Sagunski H, Grams H, Link B, Twardella D: Verhalten, Vorkommen und gesundheitliche Aspekte von Feinstäuben in Innenräumen. Bd. 17, Schriftenreihe Materialien zur Umweltmedizin, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Erlangen, 2007.

Kemski J, Klingel R, Stegemann R: Validierung der regionalen Verteilung der Radonkonzentration in Häusern mittels Radonmessungen unter Berücksichtigung der Bauweise. Schriftenreihe Reaktor-sicherheit und Strahlenschutz, BMU 2004-641, Bonn, 2004.

Kim D, Sass-Kortsak A, Purdham JD, Dales RE, Brook JR: Sources of personal exposure to fine particles in Toronto, Ontario, Canada. J Air Waste Manag Assoc, 2005, 55, 1134-1146.
Kirchner S, Laurent A, Collignan B, LeMoullec Y, Ramalho O, Villenave J, Flori J: Impact of the urban pollution on the indoor environment - experimental study on a mechanical ventilated dwelling. Proc Indoor Air, 2002, 1, 164-169.

Klingel R: Persönliche Mitteilung, April 2008, Datenbasis der angegebenen Werte: Vom BfS

/ BMU geförderte Strahlenschutz-Forschungsvorhaben.

Pettenkofer M v: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cotta-Verlag, München, 1858.

Ransome A: On the organic matter of human breath in health and disease. J Anat Physiol, 1870, 4(Pt 2), 209-217.

Rudnick S, Milton D: Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. IndoorAir, 2003, 13, 237-245.

Seegen J, Nowak J: Versuche über die Ausscheidung von gasförmigem Stickstoff aus den im Körper umgesetzten Eiweißstoffen. Pflügers Arch Physiol, 1879, 19, 347-415.

Uffelmann: Luftuntersuchungen, ausgeführt im hygienischen Institute der Universität Rostock. Archiv für Hygiene, 1888, 8, 262-350.

Umweltbundesamt: „Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität (Amtsblatt EG L 296 S. 55).
<http://www.umweltbundesamt.de/luft/infos/gesetz/eu/luft-rl.htm>.

Umweltbundesamt: Beurteilung der Luftqualität in Deutschland für das Jahr 2003. <http://www.env-it.de>, 2008.

Wageningen N v, Waegemaekers M, Brunekreef B, Boleij J: Health complaints and indoor moulds in relation to moist problems in homes. Proc Indoor Air, 1987, 1, 723-727.

WHO: Radon and cancer. Fact sheet N°291, Juni 2005.

Witthauer J, Horn H, Bischof W: Raumluftqualität. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1993

参考文献（数据）

Andersen CE, Bergsøe NC, Majborn B, Ulbak K: Radon and natural ventilation in newer Danish single-family houses. IndoorAir, 1997, 7, 278-286.

Baek S, Kim Y, Perry R: Indoor air quality in homes, offices and restaurants in Korean urban areas - indoor/outdoor relation -ships. Atmos Environ, 1997, 31, 529-544.

Blondeau P, Iordache V, Poupard O, Genin D, Allard F: Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. Indoor Air, 2005, 15, 2-12.

Burkart W, Wernli C, Brunner H: Assessment of additional exposures and risks from airtightening of homes in an alpine area with high radon emanation. Proc Indoor Air, 1984, 2, 67-72.

Burkart W, Wernli C, Brunner H: Matched pair analysis of the influence of weather stripping on indoor radon concentration in Swiss dwellings. Radiat Prot Dosim, 1984, 7, 299-302.

Burton L, Girman J, Womble S: Airborne particulate matter within 100 randomly selected office buildings in the

1. 提高建筑物外围护结构气密性的原因

- United States(base). Proc Healthy Buildings, 2000, 1,157-162.
- Cyrs J, Pitz M, Bischof W, Wichmann H, Heinrich J:** Relationship between indoor and outdoor levels of fine particle mass, particle number concentrations and black smoke under different ventilation conditions. J Expo Anal Environ Epidemiol, 2004, 14, 275-283.
- D'Amato G, Russo M, Liccardi G, Saggese M, Gentili M, Mistrello G, D'Amato M, Falagiani P:** Comparison between outdoor and indoor airborne allergenic activity. Ann Allergy Asthma Immunol, 1996, 77, 147-152.
- Fischer P, Hoek G, Reeuwijk H v, Briggs DJ, Lebreit E, Wijnen JH v, Kingham S, Elliott P:** Traffic-related differences in outdoor and indoor concentrations of particles and volatile organic compounds in Amsterdam. Atmos Environ, 2000, 34, 3713-3722.
- Funasaka K, Miyazaki T, Tsurubo K, Tamura K, Mizuno T, Kuroda K:** Relationship between indoor and outdoor carbonaceous particulates in roadside households. Environ Pollut, 2000, 110, 127-134.
- Gotschi T, Oglesby L, Mathys P, Monn C, Manalis N, Koistinen K, Jantunen M, Hanninen O, Polanska L, Kunzli N:** Comparison of Black Smoke and PM_{2.5} Levels in Indoor and Outdoor Environments of Four European Cities. Environ Sci Technol, 2002, 36, 1191-1197.
- Hagenbjork-Gustafsson A, Forsberg B, Hestvik G, Karlsson D, Wahlberg S, Sandstrom T:** Measurements of indoor and outdoor nitrogen dioxide concentrations using a diffusive sampler. Analyst, 1996, 121, 1261-1264.
- Hanninen OO, Lebreit E, Ilacqua V, Katsouyanni K, Kunzli N, Sram RJ, Jantunen M:** Infiltration of ambient PM_{2.5} and levels of indoor generated non-ETS PM_{2.5} in residences of four European cities. Atmospheric Environment, 2004, 38, 6411-6423.
- Hayes S:** Estimating the effect of being indoors on total personal exposure to outdoor air pollution. JAPCA, 1989, 39, 1453-61.
- Hollowell C, Berk J, Boegel M, Ingersoll J, Krinkel D, Nazaroff W:** Radon in energy efficient residences. LBL-Report 9560, 1980. **Holt G:** Seasonal indoor/outdoor fungicidal and indoor bacteria levels in non-complaint office buildings. Proc Indoor Air, 1990, 2, 33-38.
- Hugg T, Rantio-Lehtimäki A:** Indoor and outdoor pollen concentrations in private and public spaces during the Betula pollen season. Aerobiol, 2007, 23, 119-129.
- Kirchner S, Laurent A, Collignan B, LeMoullec Y, Ramalho O, Villenave J, Flori J:** Impact of the urban pollution on the indoor environment - experimental study on a mechanical ventilated dwelling. Proc Indoor Air, 2002, 1, 164-169.
- Lawrence A, Masih A, Taneja A:** Indoor/outdoor relationships of carbon monoxide and oxides of nitrogen in domestic homes with roadside, urban and rural locations in a central Indian region. Indoor Air, 2004, 15, 76-82. **Lee T, Grinshpun S, Martuzevicius D, Adhikari A, Crawford C, Luo J, Reponen T:** Relationship between indoor and outdoor bioaerosols collected with a button inhalable aerosol sampler in urban homes. Indoor Air, 2006, 16, 37-47. **Li C:** Relationships of indoor/outdoor inhalable and respirable particles in domestic environments. Sci Total Environ, 1994, 151, 205-211.
- Lung SC, Mao F, Liu LS:** Residents' particle exposures in six different communities in Taiwan. Sci Total Environ, 2007, 377, 81-92.
- Lustenberger J, Monn C, Wanner H:** Measurements of ozone indoor- and outdoor-concentrations with passive sampling devices. Proc Indoor Air, 1990, 2, 555-560.
- Matson U, Kvernes M, Ekberg L:** Pollen allergen concentrations in a pre-school building and a day-care centre. Proc Indoor Air, 2002, 2, 467-472.
- Meldrum J, O'Rourke M, Boyer-Pfersdorf P, Stetzenbach L:** Indoor residential mold concentrations as represented by spore and colony counts. Proc Indoor Air, 1993, 4, 189-194.
- Monn C, Fuchs A, Hogger D, Junker M, Kogelschatz D, Roth N, Wanner H:** Particulate matter less than 10 µm (PM₁₀) and fine particles less than 2.5 µm (PM_{2.5}) relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. Sci Total Environ, 1997, 208, 15-21.
- Monn C, Hangartner M, Wanner H:** Indoor measurements of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in mechanically and naturally ventilated rooms compared with outdoor measurements. Proc Indoor Air, 1987, 3, 272-276.
- Moschandreass D, Rector H:** Indoor radon concentrations. Environ Int, 1982, 8, 77-82.
- Muller, J:** Indoor and outdoor air measurements at a city street with heavy traffic. Staub Reinhalt Luft, 1991, 51, 147-154.
- Pasanen A, Reponen T, Kalliokoski P, Nevalainen A:** Seasonal variation of fungal spore levels in indoor and outdoor air in the subarctic climate. Proc Indoor Air, 1990, 2, 39-44.
- Pei-Chih W, Huey-Jen S, Chia-Yin L:** Characteristics of indoor and outdoor airborne fungi at suburban and urban homes in two seasons. Sci Total Environ, 2000, 253, 111-118.
- Quackenboss J, Spengler J, Kanarek M, Letz R, Duffy C:** Personal exposure to nitrogen dioxide: relationship to indoor/outdoor air quality and activity patterns. Environ Sci Technol, 1986, 20, 775-783.
- Romieu I, Cortez L, Colome S, Mercado G, Geyh A, Ruiz V, Palazuelos R, Hernandez A:** Evaluation of indoor ozone concentration and predictors of indoor-outdoor ratio in Mexico city. Air Waste Manage, 1998, 48, 327-335.
- Rowe D, Noh M, Al-Dhowalia K, Mansour M:** Indoor outdoor relationship of suspended particulate matter in Riyadh, Saudi Arabia. J Air Pollut Control Assoc, 1985, 35, 24-26.
- Sarnat JA, Long CM, Koutrakis P, Coull BA, Schwartz J, Suh HH:** Using sulfur as a tracer of outdoor fine particulate matter. Environ Sci Technol, 2002, 36(24), 5305-14.
- Senitkova I:** Indoor radon concentration and air change. Proc Healthy Buildings, 2000, 3, 85-90.
- Spengler J, Ferris B, McCarthy J:** The implications of sulfur dioxide and nitrogen dioxide levels inside and outside of homes on health effects research. Proc Annu Meet Air Pollut Control Assoc, 1978, 20 S.
- Sterling D, Lewis R:** Pollen and fungal spores indoor and outdoor of mobile homes. Ann Allergy Asthma Immunol, 1998, 80, 279-85.
- Wallace L, Williams R:** Use of Personal-Indoor-Outdoor Sulfur Concentrations to Estimate the Infiltration Factor and Outdoor Exposure Factor for Individual Homes and Persons. Environ Sci Technol, 2005, 39, 1707-1714.
- Weschler C, Shields H, Naik D:** Indoor ozone exposures. JAPCA, 1989, 39, 1562-568.

dLueX
die Luftdichtexperten

空气密度测量专家

我们测量并分析建筑（至550万立方米的大小）

办公建筑
物流中心
购物中心
冷藏库
游泳池

为将来而测试

近十年经验

德国可持续建筑认证体系（DGNB）诸多项目的合作伙伴

Fliib认证会员

卓越的专家团队



www.dLueX.com



2. 对于气密性要求的历史沿革—过去和现在

安娜·芬格琳 Anne Fingerling

关于鼓风机的一小故事

据说，古希腊哲学家苏格拉底（公元前 470 — 399）曾经断言：“理想的房子应该是冬暖夏凉的”（胡姆（Humm）1990，第 7 页）。有两个因素决定室内居住环境舒适健康程度：建筑物外围护结构的良好保温和气密性。

2.1 气密性的历史沿革

纵观建筑历史，可以看到人类一直在追求尽可能减少建筑物外围护结构的透气性。人们用藓苔或泥土堵塞原木结构上的缝隙，阻止不舒服的冷风渗透。

在芦苇或木条墙内侧覆盖大面积的木板或石膏板，也是为了降低透气性。在改造老建筑时经常可以发现墙



图 2.1: 在原木结构建筑上用藓苔和泥土堵塞缝隙。（照片：艾克-海尼希（Eicke-Hennig））

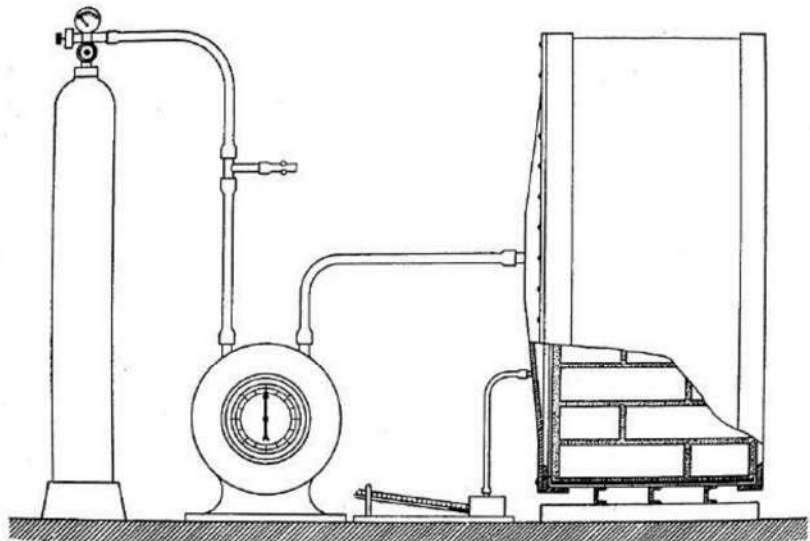


图 2.2: 莱西（Raisch）不再仅仅关注建筑材料，而是整个墙体。这是他用于检测墙体气密性的试验装置（来源：莱西 1928）。

上和楼板上糊着旧报纸。这些历史印迹清楚地说明，先人们用这种极简陋的方法是为了挡风，而一定不是想以此给后来人留下点什么时代信息（普莱斯希（Preisig）1990，第 4 页）。以前的窗户都是很不严密的，因为那时还没有发明嵌槽式密封技术。为了减少冬季渗风，经常在两窗中间填塞枕头和卷起来的棉被。现在有时候还能在老建筑上见到这种简单的临时性封堵措施。现在许多生产厂家能够提供各种产品和系统解决方案，来保证建筑物外围护结构耐久性高质量的气密性，而其前提一定是必须进行高质量、无缺陷的施工。对于这方面的介绍可详见第 4 章“粘贴—材料和工艺”。

2.1.1 会呼吸的墙体？

从 19 世纪开始，室内空

气质量和卫生逐渐得到重视。这里不能不提化学家和健康学家马科斯冯佩滕科费尔的名字。他所做的一系列非常著名的研究（本文不予赘述），使他作出了这样的假设，即透过外墙的空气交换对净化室内空气有重要贡献（佩滕科费尔 1877）（瓦尔西（Walch）1997）。

然而自 20 世纪初叶以来，这个理论已经被超越了：

1928 年，艾文莱西证明，健康学家要求利用‘会呼吸的墙体’更新室内空气的理由是不合理的。相反，“不可避免的漏风门窗”（莱西 1928，第 489 页）会造成大量热损失。

莱西在当时就已经认识到抹灰对于改善砌筑结构气密性的重要性。他发现，无论砌筑结构还是轻木结构，抹灰表面漏风率 $q_{50} < 1$

$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ，尤其是有水泥添加剂或有涂料的表面甚至可以达到 $q_{50} < 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ 。（韦尔纳（Werner）/策勒（Zeller）1993，第4页；莱西 1928，第484-485）

在今天，“密封”意味着整个建筑物外围护结构要有像抹灰砌筑墙体一样的气密性。（策勒/比亚辛（Biasin）1998）

2.1.2 对气密性的认识过程

1973年是气密性发展史上决定性的一年；这一年发生了所谓的能源危机。此前的建筑，按照现在的准则评价属于节能标准很差的建筑，透气性也很高。防潮一直被作为建筑物外围护结构的一项基本任务，而气密性往往被忽视。直到70年代，还没有对气密性提出要求。那时候，人们对不舒服的冷风渗透和大风时暖气不热习以为常。许多“1970前盖的建筑在中等风速条件下，换气次数达到每小时8-10次”（奥斯瓦尔德（Oswald）1995，第128页）。窗户是主要的漏风部位。

按照 DIN 4108 — “高层建筑保温”（1969年8月版）

建造的“标准房”代表了当时德国的平均建筑标准。也就是说，之前几乎所有住宅都是通过不密封的建筑物外围护结构和窗户进行无组织通风。只有在1974年10月版的DIN 4108增加了“补充性规定”以后，才开始通过限制窗户的缝隙渗风显著减少居室的过风量。带有唇形密封的气密性窗户开始得到推广（奥斯瓦尔德1995）。

“能源危机”后，减少传热损失和通风散热损失被提到议事日程。不仅窗户密封了，而且墙体和屋面也做了保温。瑞士的调查证明，这样做的结果是“室内空气湿度增加了10-15%，在建筑结构热桥部位开始出现结露霉变”（普莱斯希1990，第4页）。这些现象在德国同样存在。

加拿大建筑科学家普拉茨（R.E.Platts）在1962年就认识到，与热损失并存的空气流“几乎始终是严重结露现象的根源”（策勒（Zeller）等1995，第7页），特别在轻木结构上这种结露会导致对建筑物的伤害。这些认识在60和70年代开始慢慢被人们所接受。只要是在德国实验室和户外试验得出的认

识，大部分被作为“屋面外部通风试验中的‘垃圾产品’对待。所以，有时，在关于冷屋面还是热屋面和建筑结构外侧的‘正确通风哲学’的很激烈的辩论中，气密性问题只是一个陪衬。”（策勒等1995，第7页）。

只有在1981年颁布的ASHRAE标准中（美国暖通空调工程师协会；相当于德国的工程师协会VDI）才给出了明确的定义：“今天大家一致承认，渗风将水蒸气输送到结露部位（...）的作用远大于水蒸汽本身的扩散。”（策勒等1995，第7页）。

2.1.3 协会纷纷成立

作为对“能源危机”的反应，飞利浦公司于1974年在位于亚琛的研发中心建起了一栋能源试验楼，即所谓的飞利浦试验楼，用于测试各种减少建筑物热损失的措施。该建筑设计简单，采用快装配结构和尺寸较小的窗户，提高了保温厚度和建筑物外围护结构的气密性。在当时却引来了许多强烈的批评声。许多建筑师不是把这种节能建筑看作新的发展机遇，而是害怕会限制他们的自由发挥。他们把提高建筑物紧凑性看成是“积木式建筑设计”的一种威胁（芬格琳1996）（菲斯特（Feist）1997）。

就是“建筑物理学上的气密性”，也受到公众舆论不公正的负面评价。他们感情冲动地呼喊：“救命啊，我们会在密闭建筑物中窒息”或者“有人想让我们生活在保温瓶里”（普莱斯希1990）（艾克-海尼希1994）。



图 2.3: 1973 年石油危机前后建筑物的气密性。（来源：质量监督专家工作组，德本多夫（Duebendorf）/瑞士）

但是，对于“能源危机”也有完全另一种反应。1974年，工业发展组织（OECD）成立了国际能源署（IEA）。作为第一批项目，国际能源署在70年代下半叶在“建筑和公共设施节能”分项目框架内成立总部在英国的“冷风渗透研究中心”。研究中心致力于整合国际上开展的空气渗透研发工作，组织各种会议，出版了大量技术资料，为在国家和国际层面制定一系列标准和建议作出了重大贡献”（策勒等 1995，第 73 页）。1980 年中叶，这个中心扩大为“冷风渗透和通风中心（AIVC），增加了“室内空气流动和建筑物通风”研究内容。从此时开始，联邦德国也成为了 AIVC 的成员国家（策勒等 1995）。

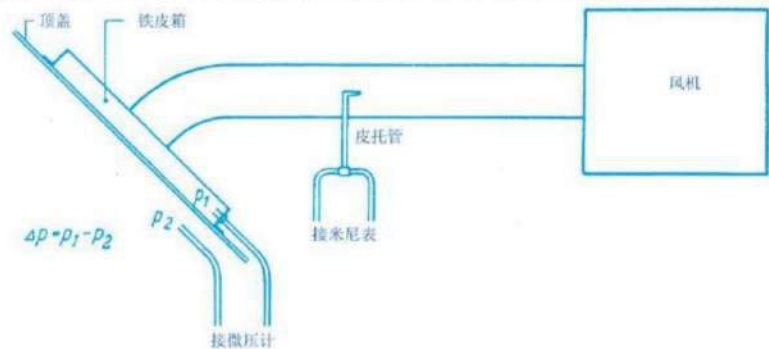
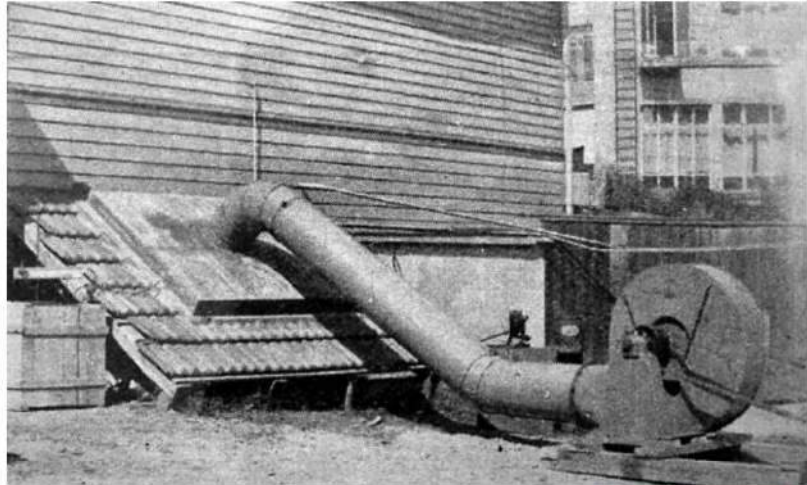


图 2.4: 按赛特乐方法测量屋面层透气性的试验构造。（赛特乐 1932）

2.1.4 强烈的批评声和误解

1984 年 2 月 24 日颁布的建筑保温法规（WSVO1984）替代了 1977 版建筑保温法规，对新建建筑和既有建筑（在改造时）提出了最低保温法律要求。对外窗和门联窗缝隙提出了渗风系数限制。在法规一般规定中写增加了以下文字：“传热外围护结构的其他缝隙必须按照当时技术水平进行耐久性密封。”而进一步的解释就没有了（科努布劳赫（Knublauch）等 1987）。

对于屋面透气性没有提出过正式要求。早在 20 世纪 30 年代，赛特乐（E. Settele）就进行过“不同屋面构造透气性”的研究（赛特乐 1932）。

他证明了对最上一层楼

板进行保温的必要性，并提出“应该对屋面进行密封以防止冷风渗透”，并指出“在起风时，太薄的楼板和透气性瓦片损失的热量比密封屋面大许多”（赛特乐 1932，第 322 页）。

虽然在 1960 年 5 月 DIN4108 颁布后已理所当然的认为缝隙应该是密封的。但是在建筑实践中有多少位置存在缝隙也理所当然地被“遗忘”了。

数十年来，“坡屋面冷风渗透”一直是个老生常谈的话题。因屋面漏风发生过许多纠纷（奥斯瓦尔德 1995）。但是一直到 90 年代还有人错误的相信“适当的透气性”可以保证最小换气次数（策勒/韦尔纳/克勒特（Kahlert）1997）。

2.1.5 开始形成标准

90 年代中期以前，德国基本没有建筑物外围护结构透气性的标准。所以，1995 年 1 月 1 日生效的建筑保温法规（1995WSVO）与之前的法规有明显的区别。法规第 4 章（1）明确要求，在使用板条式、对接式、搭接式或板式建筑构件或建筑构件覆盖层时，应该在“整个面上设置不透风防护层”。附件 4 第 2 条对气密性要求做了补充说明：“只要在具体情况下要求审查是否满足第 4 章（...）的要求，就应该按照公认技术规则进行检查。”此外，附件 4 第 2 条第一次提出，在具体情况下可能需要进行现场测试，检测是否满足气密性要求（菲斯特 1997）。

在 90 年代, 研究重点逐步转向了减少气密性差造成的通风散热损失。因为随着保温标准的提高, 这部分损失的占比明显增加。

尽管如此, 专业人士还是抱怨在建筑实践中对气密性关注太少: “DIN4108 ‘高层建筑保温’ (1981 年版) (在 1996 年才出版了第 7 部分 ‘建筑构件和节点的气密性’ (标准试行版 1996 年 5 月)) 和建筑保温法规 (WSVO 1995) 对气密性的轻描淡写与其重要性不成比例。” (盖斯勒 (Geissler) / 豪泽 (Hauser) 1996, 第 1 页 / 也可参见韦尔纳 1996)。

屋面工和木工行业协会总会却在 1991 年就已经将 “气密性意义和施工的具体意见” 写进了技术规程 (菲斯特 1997, 第 59-60 页)。

2.1.6 统一标准

位于日内瓦的国际标准化组织 (ISO) 于 1990 年提出了一份题为 “保温—建筑物气密性的确定—鼓风机法” 的标准初稿。该标准草案 (ISO/DIS 9972) 包括了测试方法、建筑物准备和测量边界条件 (如室外气象条件) 的相关内容。DIN 4108 附录 1 的讨论稿当时就引用了这份标准草案。

1990 年开始, ISO/DIS 9972 成为测量建筑物气密性的国际标准, 并且依据 70 年代中期开发的差压试验方法, 通常称为 “鼓风机法” (奥斯瓦尔德 1995) (韦尔纳 1996)。

建筑保温法规 (WSVO

1995) 提出的 “个例检查” 也是采用 ISO 9972 的差压法 (韦尔纳 1996) (菲斯特 1997)。

2.1.7 从 “风窗” 到 “风门”

70 年代末, 国际上开始采用所谓的 “鼓风机” 进行建筑物的压力测试。

我们所认识的 “鼓风机”, 1997 年在瑞典第一次使用, 不过当时还叫做 “风窗”。阿肯布朗沙特贝格 (Ake Blomsterberg) 把这个思路输出到了美国。出于研究目的, 他也于 1979 年到了位于加利福尼亚州伯克利市的普林斯顿大学。测试系统为理解冷风渗透现象提供了可能。当时还是普林斯顿大学技术员的肯盖茨贝 (Ken Gadsby) 制作了第一台实用型风门。因为与窗户相比, 门的尺寸是标准的, 所以第一次将风机安装在一扇门的填充物内 (安德森 (Anderson) 1995) (尼尔森 (Nelson) / 杜特 (Dutt) 2008)。

1979 年在普林斯顿大学劳伦斯—伯克利国家实验室 (LBNL) 第一次使用新开发的 “鼓风机”。试验发现, 隐蔽的漏损所造成的通风散热损失, 比显而易见的薄弱环节如门窗和电气线路穿墙口造成的损失大很多 (安德森 1995)。

“鼓风机” 和 “房屋医生” 这些名称可以追溯到普林斯顿大学在这个时期从事的工作。“房屋医生” 表示利用仪器设备诊断建筑物。借助这种方法, 可以很快找到隐蔽的缺陷, 帮助设计修缮

和节能措施 (尼尔森/杜特 2008)。

“鼓风机” 作为科学实验仪器经受了实践的考验。正如节能公司 (Energy Conservatory) 的共同创始人盖里安德森 (Gary Anderson) 所说: “风门最大的威力在于它开创了将房子作为一个系统来理解的先河, 并能够借助差压确定和诊断薄弱环节。” (安德森 1995, 第 22 页)。第一代风门测试仪器, 是在充满理想主义状态下在北美生产和进一步研发的。一开始是在家里的车库里倒腾, 安德森回忆说。第一批用胶合板和丽盛板制作的风门很笨重, 使用很不方便, 后来就越做越轻巧了。

开始时, 北美有三家公司生产风门测试仪器。节能公司 (Energy Conservatory) 把用得最多的 “Minneapolis 风门” 带到了德国市场。Infiltec 在 1980 年售出了第一台鼓风机。Retrotec 同样从 1980 年开始进入市场 (安德森 1995)。

2.1.8 测试

在德国, 1986/87 在北莱茵威斯特法伦州的一个低能耗建筑项目和 1988 年在位于斯特莱巴赫 (Strechsbach) 的低能耗建筑上, 利用差压方法进行了第一批测试 (策勒等 1995) (韦伯 (Weber) 1989)。

在 1987 年完成的斯特莱巴赫低能耗建筑项目上, 建筑师曼弗莱德苏赫 (Manfred Such) 第一次尝试将斯堪的纳维亚的经验用

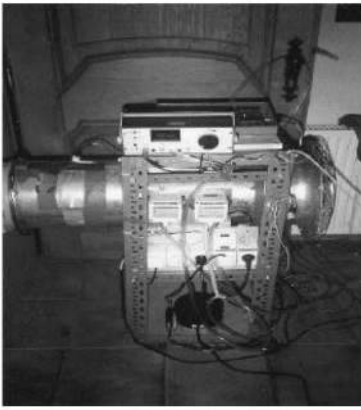


图 2.5: 在斯特莱巴赫的低能耗建筑上使用的第一台自己组装的测试设备, 用了缩短的测量段, 风机事先进行了标定。(照片: eboek)

于德国。这个独栋别墅项目得到了德国联邦黑森州环境部的资助, 达姆施塔特住房和环境研究所 (IWU) 进行了科学跟踪和咨询服务 (芬格琳 1996)。约翰纳斯韦尔纳 (Johannes Werner) (eboek 工程咨询公司) 和图林根物理研究所合作进行了静态压力测试。当时使用的还是第一台自己制造的测试装置 (策勒等 1995)。

在测量体积流量时, 一开始使用了压缩刨花板替代门扇, 严丝合缝的装在了门洞里。由于运输原因分成两

个部分的刨花板上有一个洞, 用于严密地连接风机管道。风机和文丘里流量计装在一辆小车上 (图 2.6)。利用文丘里流量计 (外径 20 cm) 测量流量。流量计前有

一根两米长缠绕镀锌管作为稳定段, 以防止湍流 (韦尔纳 1989)。这样做虽然可以获得非常精确的测量结果, 但是系统组装十分费事。

后来撤掉了稳定段, 剩下的仪器在试验台做了标定 (韦伯 1989)。这样测量就可以不要长长的管道了, 尽管测量精度有所下降。简化后的系统缩短到了只有 1.2 m (原来的有 3 m 长), 轻巧了很多。

在斯特莱巴赫的测量中, 还把刨花板精确裁剪到门洞口尺寸, 因而只能用于这个门洞。后来开发了灵活的木质或铝制安装框, 在几何尺寸上做了重大改进。在“黑森州 30 栋低能耗房”

项目范围内, 1989/90 在德国首次进行了一系列的鼓风机测量。黑森州对这个项目给予资金支持, 达姆施塔特住房和环境研究所提供科学技术服务。测量结果表明, “有些案例 (建筑物外围护结构) 气密性比预期差了 10 倍多”; 而有些建筑表现良好。这就说明, “只要认真施工, 好的气密性是完全可以达到的” (艾克海尼希等 1997, 第 2 页)。

位于斯普林根—谔尔达克森能源环境中心 (EUZ) 的建筑+能源—环境工程师联合会和位于图宾根的 eboek 工程咨询公司从 1988/1989 年开始利用差压方法测量, 他们属于将风门用于现场试验的德国第一批测量公司。和现在一样, 最常用的设备是“Minneapolis 风门” (策勒等 1995)。

80 年代末, 在德国开始销售第一批系列化风门。从 1989 年开始, 能源环境中心 (风门责任有限公司) 在德国经销“Minneapolis 风门”。1997 年开始, 由 ProTherm 公司推出“INFILTEC E-3 风门”。从 2002 年开始市场上可以买到 Woehler BC 21 BlowerCheck。

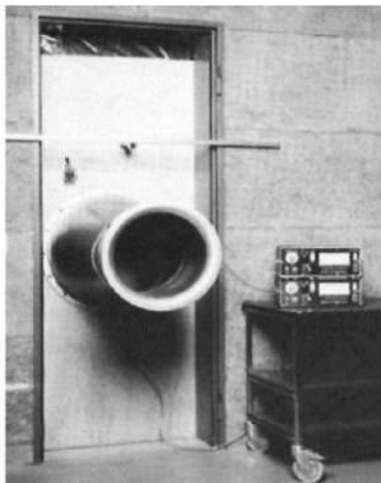


图 2.6: 第一批风门测量仪器很笨重。1987 年利用这套风门在瑞士材料实验所 EMPA 进行了测量。(照片: 质量控制专家工作组, 德本多夫/瑞士)

2.1.9 建筑法规定的气密性

建筑实践也会经常遇到法律问题：外围护结构的“不密封”在多大程度上不会被认为是建筑缺陷？换气次数达到多少才可以被评价为达到了足够的气密性？

直到 90 年代末，专业人士一致认为德国缺少检测建筑物外围护结构，特别是既有建筑气密性的法律规定，或者抱怨现有标准太不具体，因而得不到可靠保证（盖斯勒/豪泽 1996）。1996 年 11 月颁布的 DIN V 4108-7 “高层建筑保温”第 7 部分“建筑构件和节点气密性”试行版，在修订过程中力争在尽可能短的时间内消除上述欠缺。迄今获得的经验和知识以及新材料的发展被融汇进了这份标准。2001 年 8 月，经过修订的标准正式颁布：DIN 4108 -7/2001 “建筑保温和节能”第 7 部分“建筑物气密性，要求、设计和施工建议以及示例”。2011 年 1 月开始施行新版标准 DIN 4108 -7/2011。

2000 年 4 月，建筑气密性专业协会（FLiB e.V）在卡瑟尔成立。其目标是促进研究和开发，通过编制技术规则提升技术水准，并为立法和标准制定提供支持。2001 年 2 月颁布 DIN EN 13829 “建筑物热工性能，建筑物透气性测试，差压方法”。从此，风门测试方法（透气性测试）在很大程度上得到了规范（盖斯勒/博伦德（Bolender）2003）。

建筑节能法规（EnEV）终于给出了非常明确的规定

和保障。因为从第一版开始，法规就把建筑气密性作为一项义务加以规定；该法规于 2002 年生效，2004 年第一次修编。2007 年和 2009 年又进行了两次更新。法规第 6 款（1）要求，“按照公认技术规则”，对传热围护结构包括接缝进行“耐久气密性”施工。

2.1.10 遵循技术规则

从事建筑私法业务的律师伍尔福科普克（Ulf Koepcke）担心设计师和施工单位不会完全信赖标准。联邦法院认为 DIN 标准中只是“带推荐性质的私人技术规则”（法律公告：IIV ZR 184/97）。“这些规则在某些情况下或许可以代表公认技术规则，但是这种成文的、因而是固化的规程经常会落后于公认技术规则的进一步发展”（科普克 2004，第 3 页）。在发生争议时，以工程验收时有效的规则为准，而不仅仅考量是否满足了合同约定（科普克 2004）。

此时，像建筑气密性专业协会这样的独立专业协会的工作显得越加重要。他们可以总结来自建筑实践和研究领域的最新知识，将它们贯彻到标准和立法过程中去。只有这样，建设单位和投资方才能获得最大的保障，居民才能获得冬暖夏凉的居所。

作者

安妮·芬格琳

卡瑟尔自由撰稿人和
节能建筑和节能改造
专业记者



参考文献

- [Anderson 1995] Anderson, Abba: TheHistory of the Blower Door. In: Home Energy, November/Dezember 1995.
- [DIN 4108] NABau: DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau. Teil 1-5. Beuth-Verlag, Berlin 1981.
- [DIN V 4108 - 7] NABau: DIN V 4108, Teil 7: Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen. Beuth-Verlag, Berlin 1996.
- [DIN 4108 - 7/2001] NABau: DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele. Beuth-Verlag, Berlin August 2001.
- [DIN 4108 - 7/2011] NABau: DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele. Beuth-Verlag, Berlin Januar 2011.
- [DIN EN 13829] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren. Beuth-Verlag, Berlin Februar 2001 (ISO 9972: 1996, modifiziert); Deutsche Fassung EN 13829: 2000.
- [Eicke-Hennig 1994] Eicke-Hennig, Werner: Wärmedämmung von Gebäuden: Vorurteile behindern die CO₂- und Energieeinsparung. In: Architektenbrief 17, Planungskriterien für die Technik der Wärmedämmung im Hochbau, September 1994.
- [Eicke-Hennig u.a. 1997] Eicke-Hennig, Werner / Jäkel, Michael / Zeller, Joachim: Endbericht zum Förderprogramm „30 Niedrigenergiehäuser in Hessen“, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.
- [Feist 1997] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewußtes Bauen, Heidelberg 4. Auflage 1997.
- [Fingerling 1996] Fingerling, Anne: Eine Geschichte der Niedrigenergiehäuser bis zum Passivhaus. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 1996.
- [Geisler/Bolender 2003] Geißler, A. / Bolender, T.: Luftdicht bauen! Sonderdruck aus AIRTec, Nr. 4/2003.
- [Geisler/Hauser 1996] Geißler, A. / Hauser, G.: Luftdichtheit von Holzhäusern. Sonderdruck aus Bauen mit Holz Nr. 7/1996.
- [Geisler u.a. 1997] Geißler, Achim / Bolender, Torsten / Hauser, Gerd: Blower Door-Messungen – erweiterte Meßmethode. In: HLH - Heizung Lüftung/Klima Haustechnik Bd. 48, Nr.5/Mai 1997.
- [Humm 1990] Humm, Othmar: Niedrigenergie- Häuser, Theorie und Praxis, Staufen bei Freiburg 1990.
- [ISO/DIS 9972] Draft International StandardISO/DIS 9972: “Thermal insulation - Determination of building airtightness –Fan pressurization method.” International Organization for Standardization 1990. Deutsche Fassung: Bestimmung der Luftdichtheit von Gebäuden – Differenzdruck - verfahren. Entwurf DIN EN ISO 9972. Berlin, Januar 1997.
- [Knublauch u.a. 1987] Knublauch, E. / Schäfer, H. / Sidon, S.: Über die Luftdurchlässigkeit geneigter Dächer. Sonderdruck aus GI – Gesundheits-Ingenieur 108, Heft 1/1987.
- [Kopcke 2004] Köpcke, Ulf: Fehler – Mangel – Schaden. Sonderdruck aus Trockenbau Akustik, Nr. 9/2004.
- [Nelson/Dutt 2008] Nach Angaben von Gary Nelson und Gautam Dutt, E-Mail vom Februar 2008.
- [Oswald 1995] Oswald, Rainer: Schwachstellen. Erscheinungsbilder und Ursachen häufiger Bauschäden. In: db – Das Bauzentrum, 129. Jhg., Nr. 9/1995.
- [Pettenkofer 1877] Pettenkofer, Max von: Populäre Vorträge „über das Verhalten der Luft zum Wohnhaus des Menschen“, Braunschweig 1877.
- [Preisig 1990] Preisig, Hansruedi: Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. Seminar im Rahmen der IPH-Projektes „Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle im Holzbau“, Rapperswil/Schweiz 1990.
- [Raisch 1928] Raisch, Erwin: Die Luftdurchlässigkeit von Baustoffen und Baukonstruktionsteilen. In: GI – Gesundheits-Ingenieur, 51. Jhg., Nr. 30/28. Juli 1928.
- [Settele 1932] Settele, E.: Der Wärmeschutz durch Dachkonstruktionen. In: GI – Gesundheits-Ingenieur, 55. Jhg., Nr. 27/2. Juli 1932.
- [Walch 1997] Walch, Albert: Können Wände wirklich atmen? In: Energiedepesche Nr. 3/1997.
- [Weber 1989] Weber, Richard: Forschungsprojekt Niedrigenergiehaus Schrecksbach. Bestimmung des Luftwechsels und der Dichtigkeit der Gebäudehülle an einem Niedrigenergiehaus. Diplomarbeit / Physikalisches Institut der Universität Tübingen 1989.
- [Werner 1996] Werner, Johannes: Luftdichtheit: Grundprinzipien, Meßverfahren, Konstruktionen. In: Wärmedämmung Wärmebrücken Luftdichtheit. Fachdokumentation Nr. 2, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt Oktober 1996.
- [Werner / Zeller 1993] Werner, Johannes / Zeller, Joachim: Die Luftdichtigkeit von Gebäuden und ihre Bedeutung für die Funktion und Effizienz von Wohnungslüftungsanlagen. In: Informationsdienst Holzbau Technik Nr. 7/1993.
- [WSVO 1984] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV). (Inkrafttreten: 01.01.1984) Bundesgesetzblatt, Bonn 24.02.1982.
- [WSVO 1995] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV). (Inkrafttreten: 01.01.1995) Bundesgesetzblatt, Bonn 16.08.1994.
- [Zeller u.a. 1995] Zeller, J. / Dorschky, S. / Borsch-Laaks, R. / Feist, W.: Luftdichtigkeit von Gebäuden. Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden, Darmstadt 1995.
- [Zeller/Werner/Kahlert 1997] Zeller, J. / Werner, J. / Kahlert, C.: Luftdichtheit als Planungsziel. In: DAB – Deutsches Architektenblatt Nr.4/1997.
- [Zeller/Biasin 1998] Zeller, Joachim / Biasin, Karl: Luftdichtigkeit von Wohngebäuden – Messung, Bewertung, Ausführungsdetails. RWE Energie Aktiengesellschaft (Hrsg.), Essen 2. Auflage 1998.

2.2 过去对气密性的要求

前言

从 1998 年开始，建筑保温法规、现行的建筑节能法规和 DIN 4108 第 7 部分对新建建筑透气性规定了有约束力的极限值。此前，虽然没有法定极限值，但也必须达到一定程度的气密性。至于当时对建筑物提出了什么要求，将在下文予以介绍。

A 部分包括相关规程的节选，B 部分是对这些问题的观点。

2.2.1 A 部分：以前规程的节选

2.2.1.1 建筑保温法规 (WSCHV)

1977 年 8 月 11 日的建筑保温法规

第 3 款限制不密封造成的热损失

- (1) 采暖建筑外窗和门联窗的空气渗透系数不得超过附件 2¹ 规定的数值。
- (2) 传热外围护结构内其他缝隙必须依照当时技术水平进行耐久性密封。

1.2 1994 年 8 月 16 日的建筑保温法规

第 4 款对于气密性的要求

- (1) 只要传热围护结构是由板条或对接、搭接以及板型建筑构件组成的，如果不能用其他方式保证相应气密性的话，就应该在整个面积上构造不透风层。
- (2) 采暖房间外窗和门联窗的缝隙渗风系数不得超过附件 4²... 规定的数值。
- (3) 传热外围护结构内其他缝隙必须依照当时技术水平进行耐久性密封。

附件 4

为了限制热损失而对气密性的要求

2. 整栋建筑物的气密性证明

只要要求审核是否符合本法规第 4 款第 1-3 节... 的规定，则可依据第 10 款第 2³ 节公布的公认技术规则进行检测。

2.2.1.2 DIN 4108 第 2 部分，1981 年 8 月版

6 冬季保温，冬季节能保温

6.2 限制不密封造成的热损失

6.2.1 外围护结构

6.2.1.1 必须按照当前技术水平对建筑传热围护结构的缝隙，特别是预制件之间或者在填充墙和承重结构之间的穿透性缝隙进行耐久性密封（也可参见 DIN18540 第 1 到第 3 部分）。

由零部件（如木条盖板）拼装成的建筑构件或者建筑构件层，一般必须进行补充密封。

6.2.1.2 应该特别关注窗墙结构缝，必须按照当时技术水平进行耐久性密封。

6.2.2 窗、门联窗和外门

窗、门联窗和外门扇页和框之间结构缝会造成通风散热损失，应按照 DIN 18055...对缝隙渗风系数 a 的要求加以限制⁴。

2.2.1.3 DIN V 4108-7, 1996 年 11 月版

4 一般说明

4.4 气密性证明

按照 ISO 9972 进行建筑物或部分建筑物气密性测试时，在内外压差 50Pa 条件下测量的空气体积流量与建筑物包容空气体积的比值（换气次数）：

—自然通风建筑不得超过 3 h^{-1} ...；

—有机械通风的建筑（即使采用简单的排风装置）不得超过 1 h^{-1} ...

2.2.1.4 联邦公告第 140 条, 1998 年 7 月 31 日, 第 10.885

联邦空间规划、建设和城市建设部

对于 1998 年建筑保温法规中公认技术规则的说明

...在 DIN V 4108-7...1996 年 11 月版...对足够气密性的证明给予了阐述。作为对该标准的补充，对于采用机械通风的建筑，考虑到建筑公差，只要按照这种方法在内外压差 50Pa 时测出的空气体积流量与建筑物包容空气体积之比最多不超过标准规定极限 0.5 h^{-1} 时，可以认为达到了足够的气密性。

附注

¹ 参见 DIN 18055 第 2 部分, 1973 年 8 月版

² 参见 DIN 18055, 1981 年 10 月版

³ (2) 联邦部...在联邦公报中摘引了在本法规中引用的专业机构公布的当时公认技术规则。

⁴ 关于窗和门连窗的构造特点以及缝隙渗风系数证明 a 可参见 DIN 4108 第 4 部分。

2.2.2 B 部分 专业论证和说明

2.2.2.1 公认技术规则?

1996 年 11 月, DIN 4108-7 试行版公布了 50Pa 差压下的换气次数极限值。这些极限值是否具有约束力, 取决于试行版标准在当时是否属于公认的技术规则。

按照 DIN 820, 试行标准不属于德国标准的组成部分。对采用机械通风建筑的换气次数极限值和 DIN V 4108-7 试行标准中给出的一些施工范例, 专业界是有不同意见的。因此, DIN V 4108-7 不应该属于公认的技术规则。

1998 年 7 月, 联邦公告的一份公开文件对建筑保温法规做了详细解释。该文件引述了 DIN V 4108-7 试行标准, 但是对采用机械通风的建筑提高了换气次数极限值。DIN V 4108-7 无疑因这份联邦公告而成为公认技术规则, 已无须解释, 因为这份联邦公告已经让换气次数极限值具备约束力。

2.2.2.2 对于缝隙气密性的要求

即使 DIN V 4108-7 不属于公认技术规则, 在 1998 年前至少明显的泄漏已经被视为建筑瑕疵了, 因为它违反了 DIN 4108 第 2 部分和建筑保温法规的相关规定。

DIN 4108-2 提出了冬季保温的要求。标准要求按照当时技术水平进行缝隙密封。在 90 年代, 住房和环境研究所 (IWU) 关于低能耗建筑的

出版物对当时的技术水平做了描述。

之所以对不密封抱怨不断，是因为渗风渗透影响了居住舒适性。这就说明，无论是否违反了公认技术规则或规范，不密封就说明存在使用性能缺陷。

至于如何评判哪些泄漏属于建筑瑕疵，哪些泄漏是必须容忍的，那是专家们的事。目前还不了解有没有简单的评判标准。从 2003 年 5 月 22 日建筑气密性专业协会的报告会议纪要中，可以看到对于一些观点的考虑“如果有冷风渗透，并且欧盟插手的话”。对于老建筑还必须考虑建筑物年龄。

2.2.2.3 对自由（自然）通风建筑物气密性的要求

即使在联邦公告文件颁布前，甚至在 1996 年 11 月 DIN V 4108-7 试行标准颁布前，如果换气次数严重超过 50Pa 时的 3 h^{-1} 这个后来规定的极限值，则一般被认为存在建筑瑕疵。原因如下：

- 当 50Pa 时的换气次数超过 3 h^{-1} 时，有风天气和 / 或室外温度很低时的通风散热损失，会高于按 DIN 4701 设计散热器和热能发生器功率时的通风散热损失取值。房子的供热能力便不再有保障。

可以大致这样来推算：一栋 $n_{50}=3 \text{ h}^{-1}$ 的房子，按 ISO 13789 在中等风力条件下，渗风换气次数为：

$$n = n_{50} \cdot e = 3 \text{ h}^{-1} \cdot 0.07 = 0.21 \text{ h}^{-1}$$

在有风天气，渗风换气次数会增加 2-3 倍，达到 $0.4-0.6 \text{ h}^{-1}$ 。在按 DIN 4107 设计散热器尺寸时取 0.5 倍的换气次数值。即在 $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ 时，采暖功率刚刚好，如果散热器实际尺寸不是太大的话。

- 1995 年公布的德国 105 栋低能耗建筑换气次数测试平均值为 2.5 h^{-1} 。71% 房子 n_{50} 时的换气次数达到 3.0 h^{-1} 。调查的大部分房子达到当时常见的气密性水平，可以认为具有代表性。只有少数例外，因为这些建筑按低能耗建筑方式建造，采取了特殊的气密性措施（参见“建筑物气密性”，由达姆施塔特住房和环境研究所（IWU）公布）。所以说， n_{50} 时的换气次数达到 3 h^{-1} 并非不正常的事，采用普通的构造措施就可以达到。

但是，超过今天的极限值也不在少数。当然只有 10% 的房子换气次数超过 5 h^{-1} 。

- 90 年代中期就有国家提出了气密性量化要求，换气次数在 2.5 h^{-1} （瑞典）到 4.5 h^{-1} （瑞士）。
- 联邦德国各州资助项目中要求换气次数极限值为 3 h^{-1} 。
- 1996 年 DIN V 4108-7 试行版颁布后，专业界虽然对极限值有不同意见，但主要是针对有机械通风的建筑。对于自然通风的建筑有时候要求的极限值会低一些，而不是更高。

总结：换气次数在 n_{50} 在 5 h^{-1} 和以上时，即使在 1998 年 7 月前也被认为存在建筑瑕疵。换气次数在 4 h^{-1} 时需要具体研究对策。

2.2.2.4 对于风机辅助通风建筑的气密性要求

对于有风机辅助通风的建筑，即使还没有以联邦公告形式对气密性提出正式要求，仅仅从建筑物使用功能考虑，对于 50Pa 差压下换气次数提出要求的理由也是成立的：

- 如果采用排风装置的建筑不密封，送风房间的通风效果就会受到气候影响，因为此时排风机产生的负压太小，无法超过气候产生的压力。例如，在冬天当排风机产生的负压不能超过热升力产生的正压时，上面楼层房间就会通风不良。这就可以认为建筑物存在功能缺陷。在外墙通风口关闭或被封堵时，如果换气次数 n_{50} 远大于 1 h^{-1} ，这栋建筑物就存在问题。（但是排风房间的排风不受影响）。
- 如果采用热回收送 / 排风装置的建筑不密封，就会由于内外渗风增加通风散热损失。期望的热回收节能效果就不复存在，至少也会大打折扣。

另一方面，直到 90 年代中期对于建筑气密性关系的这种认识还不很普及（参见 1998 年联邦公告）。

在联邦公告颁布前，是否允许建设采用通风装置、但气密性只有平均水平（ $n_{50} = 2.0-3.0 \text{ h}^{-1}$ ）的建筑，或者在安装了通风装置的同时是否自然会提高建筑的气密性，这类问题不应该问专家，它更多是出于法律的权衡，本书不予作答。

2.2.2.5 总结

Tabelle 1 各相关法律出台时间概览

1977-11	WSchV (建筑保温法)			
1981-8			DIN 4108-2 (德国工业标准)	
1984-1	WSchV (建筑保温法)			
1995-1	WSchV (建筑保温法)			
1996-11				DINV4108-7 ($n_{50} \leq 3h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1h^{-1}$)
1998-8		联邦公告 140 号		
2001-3		$n_{50} \leq 3h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$	DIN 4108-2	
2001-8				DIN 4108-7 $n_{50} \leq 3h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$
2002-2	EnEV (节能法) $n_{50} \leq 3h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$			
2003-4			DIN 4108-2	
2003-7			DIN 4108-2	
2004-12	EnEV (节能法) $n_{50} \leq 3h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$			
2007-10	EnEV (节能法) $n_{50} \leq 3h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$			
2009-1				EDIN4108-7 ($n_{50} \leq 3.0h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.0h^{-1}$)
2009-10	EnEV (节能法) ($n_{50} \leq 3.0h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$)			
2011-1				DIN 4108-7 $n_{50} \leq 3.0h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.5h^{-1}$ ($n_{50} \leq 3.0h^{-1}$ 或 $n_{50} \leq 1.0h^{-1}$)

现在规定的 50Pa 差压下空气体积流量极限值是为了保障建筑物的功能性和提高能效。

但是，建筑物的功能性在以前也是必要的。当一栋老建筑极限值超标时，建筑物的功能性会由于气密性差而受到影响，这种情况不应该发生。而区分建筑物功能良好和功能不好的界线是模糊的。

如果一栋建筑功能不好，比如不热、在漏损点有结露或脚底下感到冷，就说明存在瑕疵。在评判时要考虑建筑物年龄，因为以前对于舒适性，比如冷风渗透的要求不是很高的。

然而，尽管建筑物功能不存在瑕疵，在下列情况下还可能有气密性不足的问题，比如

- 未按 DIN 4108-2 或建筑保温法规要求对缝隙进行耐久性密封，
- 或者在 50Pa 差压下换气次数远大于 $3 h^{-1}$ ，因而没达到通常的气密性要求。