

---

# Anhang

---

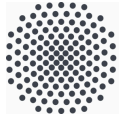
## Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

---

Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen  
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 198

# Anhänge

- I Messdaten
- II Numerisch ermittelte Daten
- III Entwurfsplanung
- IV Implementierungshilfe



Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann • Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik • Pfaffenwaldring 35 • 70569 Stuttgart



Institut für Geotechnik

Boden- und Felsmechanik,  
Erd- und Grundbau,  
Fels- und Tunnelbau  
Spezialtiefbau,  
Umweltgeotechnik

Direktor  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.  
Christian Moormann

Kontakt  
Pfaffenwaldring 35  
70569 Stuttgart  
T 0711 685-62437  
F 0711 685-62439  
Christian.Moormann@  
igs.uni-stuttgart.de  
www.uni-stuttgart.de/igs/

Aktenzeichen  
G65.1  
TK/MS  
30.06.2022

## Forschungsprogramm Straßenwesen

**FE 15.0656/2018/ERB**

### „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen“

Abschlussbericht zum 30.06.2022

Anhang I

#### Auftraggeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53  
51427 Bergisch Gladbach

#### Forschungsnehmer:

Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik (IGS)  
Pfaffenwaldring 36  
70569 Stuttgart

Bank  
Baden-Württembergische Bank Stuttgart –  
BW-Bank

IBAN  
DE51 6005 0101 7871 5216 87

SWIFT/BIC  
SOLADEST600

Umsatzsteuer-IdNr.  
DE147794196





## 1 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2-1</b>	Außentemperatur in der ersten Projektphase	9
<b>Abb. 2-2</b>	Außentemperatur in der zweiten Projektphase	9
<b>Abb. 2-3</b>	Taupunkttemperatur in der ersten Projektphase	10
<b>Abb. 2-4</b>	Taupunkttemperatur in der zweiten Projektphase	10
<b>Abb. 2-5</b>	In der ersten Projektphase gemessene Windgeschwindigkeit	11
<b>Abb. 2-6</b>	In der zweiten Projektphase gemessene Windgeschwindigkeit	11
<b>Abb. 2-7</b>	In der ersten Projektphase gemessene relative Luftfeuchtigkeit [%]	12
<b>Abb. 2-8</b>	In der zweiten Projektphase gemessene relative Luftfeuchtigkeit [%]	12
<b>Abb. 2-9</b>	In der ersten Projektphase gemessener Luftdruck	13
<b>Abb. 2-10</b>	In der zweiten Projektphase gemessener Luftdruck	13
<b>Abb. 2-11</b>	In der ersten Projektphase gemessene Niederschlagshöhe	14
<b>Abb. 2-12</b>	In der zweiten Projektphase gemessene Niederschlagshöhe	14
<b>Abb. 2-13</b>	Strömungsmessungen des Gesamtsystems und der einzelnen Felder über bisherige Projektzeit	15
<b>Abb. 2-14</b>	Testfeld A1.1, Temperaturmessung über den bisherigen Projektzeitraum	16
<b>Abb. 2-15</b>	Testfeld A1.1, Temperaturmessung während Schneeszenario	16
<b>Abb. 2-16</b>	Testfeld A1.1, Temperaturmessung während winterlichen Trägheitsszenario	17
<b>Abb. 2-17</b>	Testfeld A1.1, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario	17
<b>Abb. 2-18</b>	Testfeld A1.1, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetriebs	18
<b>Abb. 2-19</b>	Testfeld A1.1, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetriebs	18
<b>Abb. 2-20</b>	Testfeld A1.2, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum	19
<b>Abb. 2-21</b>	Testfeld A1.2, Temperaturmessung während Schneeszenario	19
<b>Abb. 2-22</b>	Testfeld A1.2, Temperaturmessung während winterlichen Trägheitsszenario	20
<b>Abb. 2-23</b>	Testfeld A1.2, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario	20
<b>Abb. 2-24</b>	Testfeld A1.2, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb	21
<b>Abb. 2-25</b>	Testfeld A1.2, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb	21
<b>Abb. 2-26</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum	22
<b>Abb. 2-27</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Schneeszenario	22



<b>Abb. 2-28</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Schneeszenario	23
<b>Abb. 2-29</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Trägheitsszenario	23
<b>Abb. 2-30</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Trägheitsszenario	24
<b>Abb. 2-31</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario	24
<b>Abb. 2-32</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb	25
<b>Abb. 2-33</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb	25
<b>Abb. 2-34</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während laminarer Durchströmung	26
<b>Abb. 2-35</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während turbulenter Durchströmung	26
<b>Abb. 2-36</b>	Testfeld A1.3, Temperaturmessung während hochturbulenter Durchströmung	27
<b>Abb. 2-37</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum	27
<b>Abb. 2-38</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung während Schneeszenario	28
<b>Abb. 2-39</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung während Trägheitsszenario	28
<b>Abb. 2-40</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario	29
<b>Abb. 2-41</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb	29
<b>Abb. 2-42</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb	30
<b>Abb. 2-43</b>	Testfeld A1.5, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum	30
<b>Abb. 2-44</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessung während Schneeszenario	31
<b>Abb. 2-45</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während Trägheitsszenario	31
<b>Abb. 2-46</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während sommerlichen Trägheitsszenario	32
<b>Abb. 2-47</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während ersten sommerlichen Regelbetrieb	32
<b>Abb. 2-48</b>	Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während zweiten sommerlichen Regelbetrieb	33
<b>Abb. 2-49</b>	Testfeld B1.1, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum	33
<b>Abb. 2-50</b>	Testfeld B1.1, Temperaturmessung während Schneeszenario	34
<b>Abb. 2-51</b>	Testfeld B1.1, Temperaturmessung während Trägheitsszenario	34
<b>Abb. 2-52</b>	Testfeld B1.1, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario	35
<b>Abb. 2-53</b>	Testfeld B1.1, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb	35
<b>Abb. 2-54</b>	Testfeld B1.1, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb	36
<b>Abb. 2-55</b>	Testfeld B1.2, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum	36
<b>Abb. 2-56</b>	Testfeld B1.2, Temperaturmessung während Schneeszenario	37



<b>Abb. 2-57</b>	Testfeld B1.2, Temperaturmessung während Trägheitsszenario	37
<b>Abb. 2-58</b>	Testfeld B1.2, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario	38
<b>Abb. 2-59</b>	Testfeld B1.2, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb	38
<b>Abb. 2-60</b>	Testfeld B1.2, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb	39
<b>Abb. 2-61</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	39
<b>Abb. 2-62</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	40
<b>Abb. 2-63</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	40
<b>Abb. 2-64</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	41
<b>Abb. 2-65</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	41
<b>Abb. 2-66</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	42
<b>Abb. 2-67</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	42
<b>Abb. 2-68</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	43
<b>Abb. 2-69</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	43
<b>Abb. 2-70</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	44
<b>Abb. 2-71</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	44
<b>Abb. 2-72</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	45
<b>Abb. 2-73</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	45
<b>Abb. 2-74</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	46
<b>Abb. 2-75</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	46
<b>Abb. 2-76</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	47
<b>Abb. 2-77</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	47
<b>Abb. 2-78</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	48
<b>Abb. 2-79</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	48
<b>Abb. 2-80</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	49
<b>Abb. 2-81</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	49
<b>Abb. 2-82</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	50
<b>Abb. 2-83</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	50
<b>Abb. 2-84</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	51
<b>Abb. 2-85</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	51



<b>Abb. 2-86</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	52
<b>Abb. 2-87</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneeszenario	52
<b>Abb. 2-88</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario	53
<b>Abb. 2-89</b>	Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder	53
<b>Abb. 2-90</b>	Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder während des Schneeszenarios	54
<b>Abb. 2-91</b>	Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder während des Trägheitsszenario	54
<b>Abb. 2-92</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	55
<b>Abb. 2-93</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	56
<b>Abb. 2-94</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	56
<b>Abb. 2-95</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	57
<b>Abb. 2-96</b>	Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	57
<b>Abb. 2-97</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	58
<b>Abb. 2-98</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	58
<b>Abb. 2-99</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	59
<b>Abb. 2-100</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	59
<b>Abb. 2-101</b>	Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	60
<b>Abb. 2-102</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	60
<b>Abb. 2-103</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	61
<b>Abb. 2-104</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	61
<b>Abb. 2-105</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	62
<b>Abb. 2-106</b>	Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	62
<b>Abb. 2-107</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	63
<b>Abb. 2-108</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	63
<b>Abb. 2-109</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	64
<b>Abb. 2-110</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	64
<b>Abb. 2-111</b>	Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	65
<b>Abb. 2-112</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	65



<b>Abb. 2-113</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	66
<b>Abb. 2-114</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	66
<b>Abb. 2-115</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	67
<b>Abb. 2-116</b>	Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	67
<b>Abb. 2-117</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	68
<b>Abb. 2-118</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	68
<b>Abb. 2-119</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	69
<b>Abb. 2-120</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	69
<b>Abb. 2-121</b>	Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	70
<b>Abb. 2-122</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur	70
<b>Abb. 2-123</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	71
<b>Abb. 2-124</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	71
<b>Abb. 2-125</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	72
<b>Abb. 2-126</b>	Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz	72
<b>Abb. 2-127</b>	Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder	73
<b>Abb. 2-128</b>	Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder	73
<b>Abb. 2-129</b>	Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder	74
<b>Abb. 2-130</b>	Testfeld A1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	75
<b>Abb. 2-131</b>	Testfeld A1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	76
<b>Abb. 2-132</b>	Testfeld A1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	76
<b>Abb. 2-133</b>	Testfeld A1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	77
<b>Abb. 2-134</b>	Testfeld A1.3, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	77
<b>Abb. 2-135</b>	Testfeld A1.3, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	78
<b>Abb. 2-136</b>	Testfeld A1.4, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	78
<b>Abb. 2-137</b>	Testfeld A1.4, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	79
<b>Abb. 2-138</b>	Testfeld A1.5, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	79
<b>Abb. 2-139</b>	Testfeld A1.5, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	80





---

<b>Abb. 2-140</b>	Testfeld B1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	80
<b>Abb. 2-141</b>	Testfeld B1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	81
<b>Abb. 2-142</b>	Testfeld B1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	81
<b>Abb. 2-143</b>	Testfeld B1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren	82
<b>Abb. 2-144</b>	Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	83
<b>Abb. 2-145</b>	Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	83
<b>Abb. 2-146</b>	Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	84
<b>Abb. 2-147</b>	Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	84
<b>Abb. 2-148</b>	Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	85
<b>Abb. 2-149</b>	Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	85
<b>Abb. 2-150</b>	Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	86
<b>Abb. 2-151</b>	Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	86
<b>Abb. 2-152</b>	Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	87
<b>Abb. 2-153</b>	Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	87
<b>Abb. 2-154</b>	Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	88
<b>Abb. 2-155</b>	Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	88
<b>Abb. 2-156</b>	Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	89
<b>Abb. 2-157</b>	Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	89
<b>Abb. 2-158</b>	Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	90
<b>Abb. 2-159</b>	Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	90
<b>Abb. 2-160</b>	Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	91
<b>Abb. 2-161</b>	Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	91
<b>Abb. 2-162</b>	Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	92
<b>Abb. 2-163</b>	Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	92
<b>Abb. 2-164</b>	Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	93
<b>Abb. 2-165</b>	Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	93
<b>Abb. 2-166</b>	Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	94
<b>Abb. 2-167</b>	Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	94
<b>Abb. 2-168</b>	Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	95



<b>Abb. 2-169</b>	Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	95
<b>Abb. 2-170</b>	Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	96
<b>Abb. 2-171</b>	Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren	96



## 2 Anhang

### 2.1 Gemessene Wetterdaten

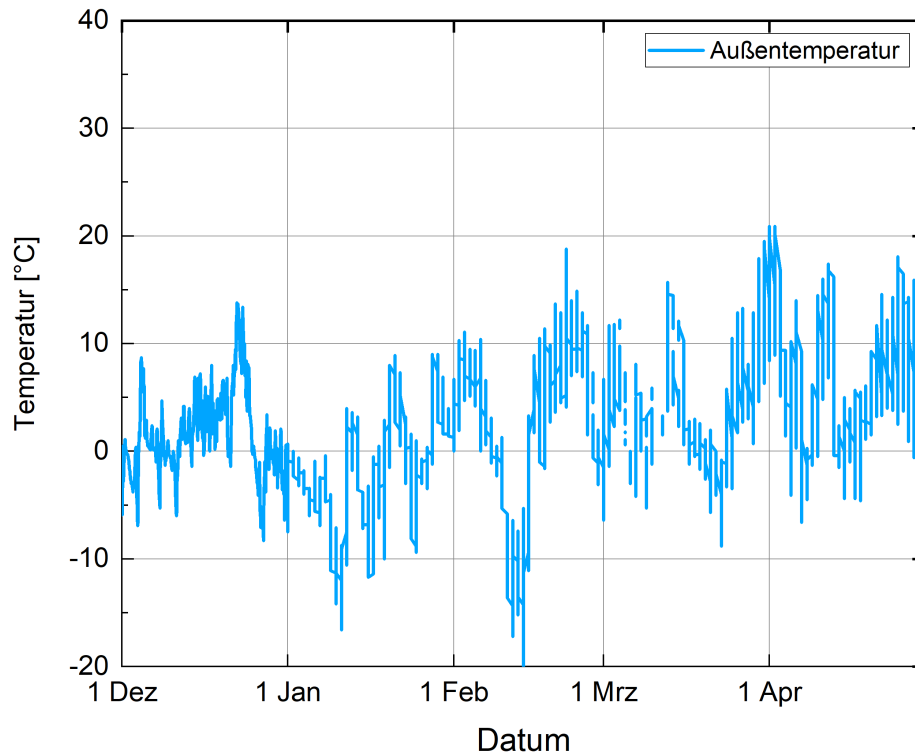


Abb. 2-1 Außentemperatur in der ersten Projektphase

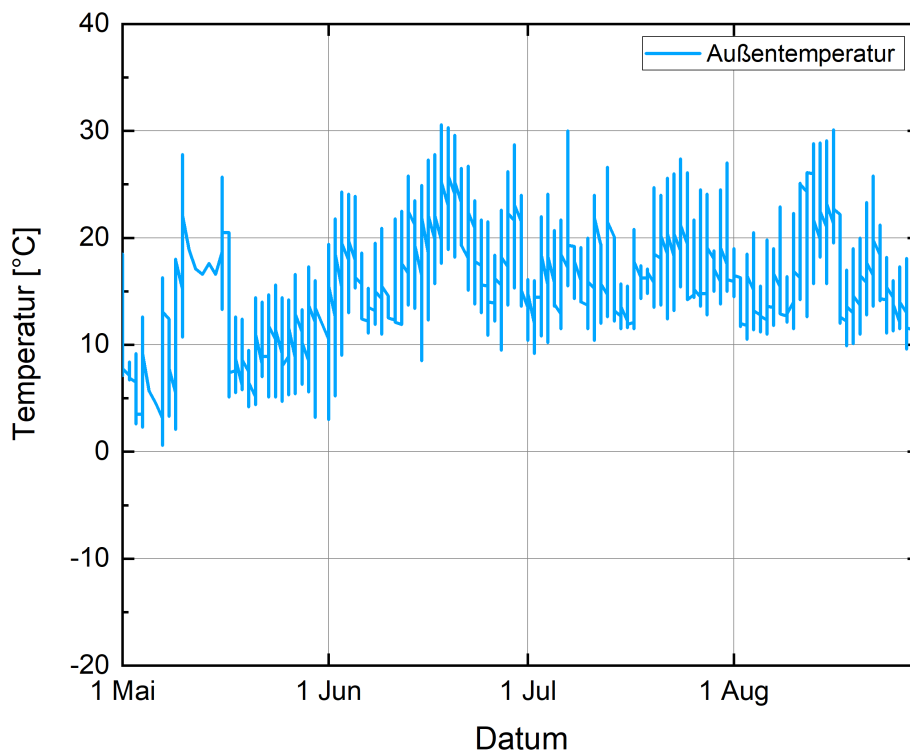


Abb. 2-2 Außentemperatur in der zweiten Projektphase

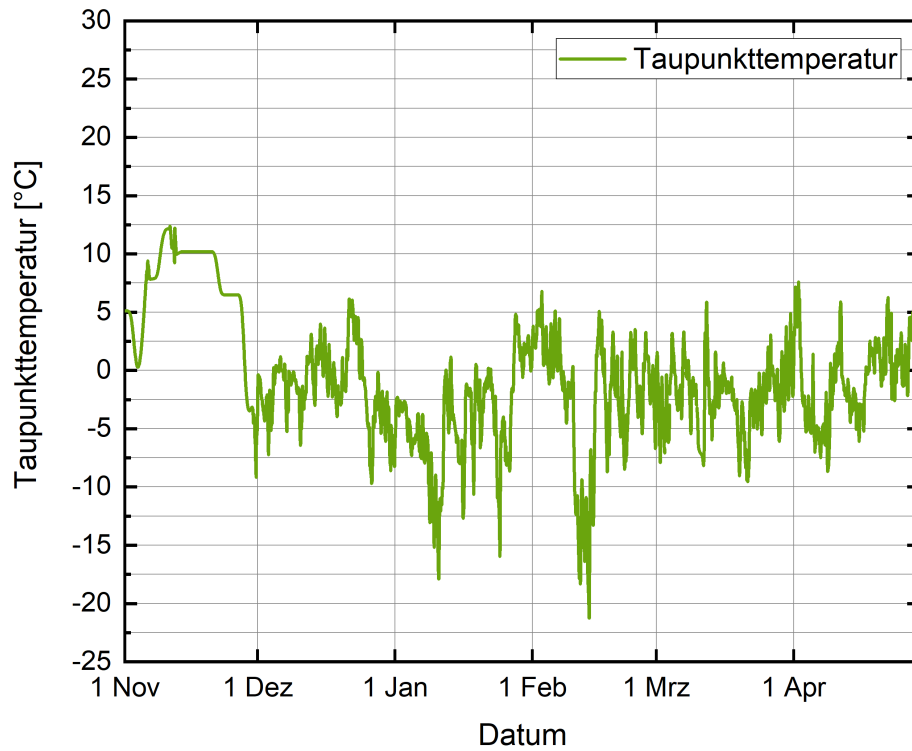


Abb. 2-3 Taupunkttemperatur in der ersten Projektphase

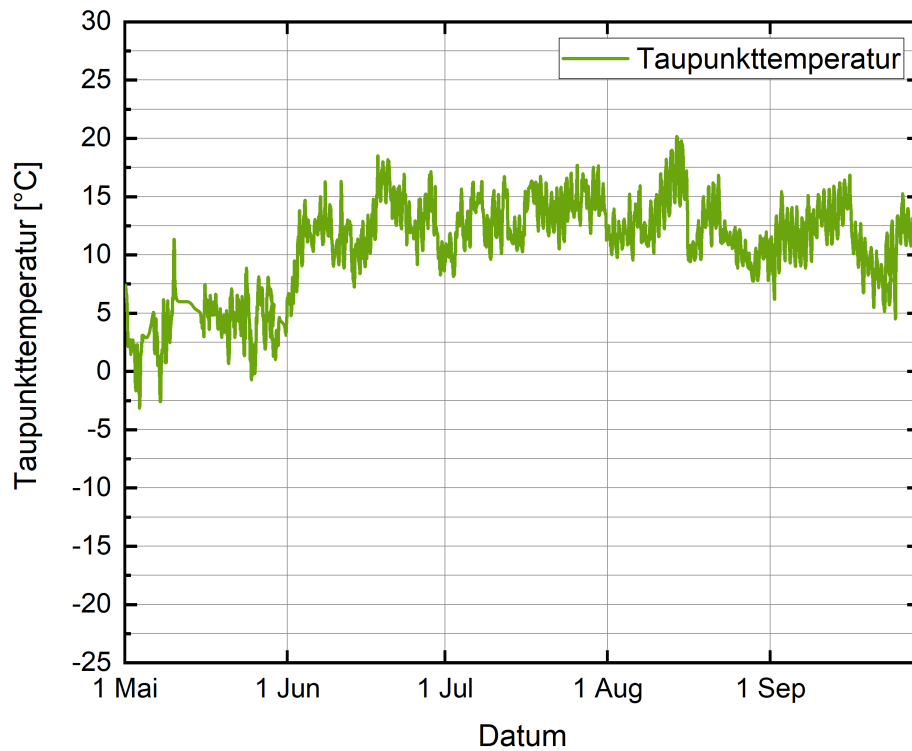


Abb. 2-4 Taupunkttemperatur in der zweiten Projektphase

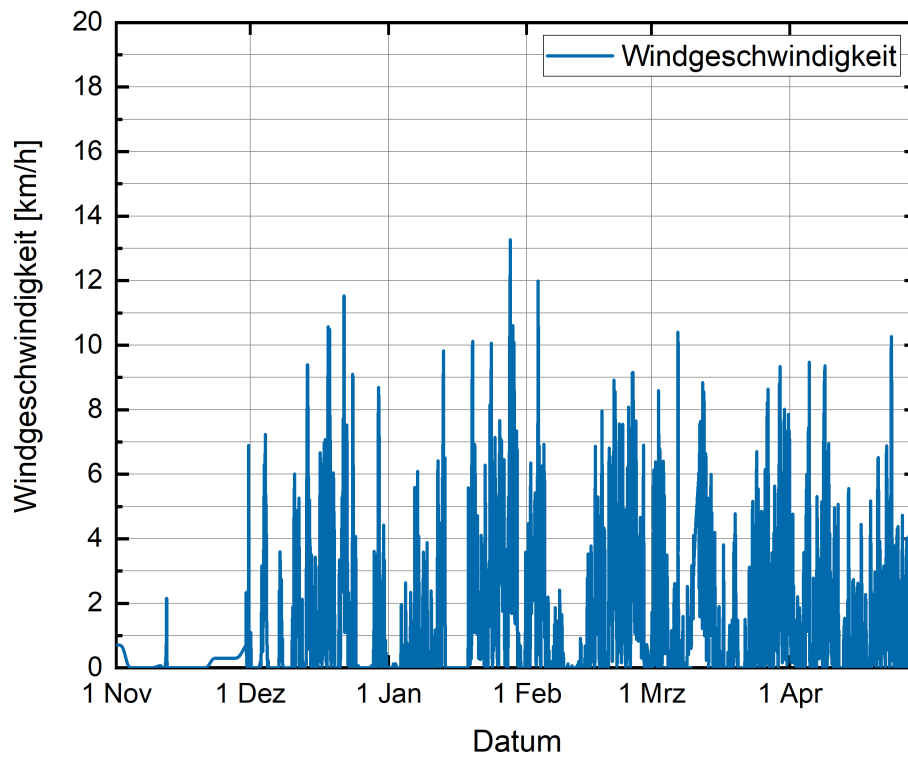


Abb. 2-5 In der ersten Projektphase gemessene Windgeschwindigkeit

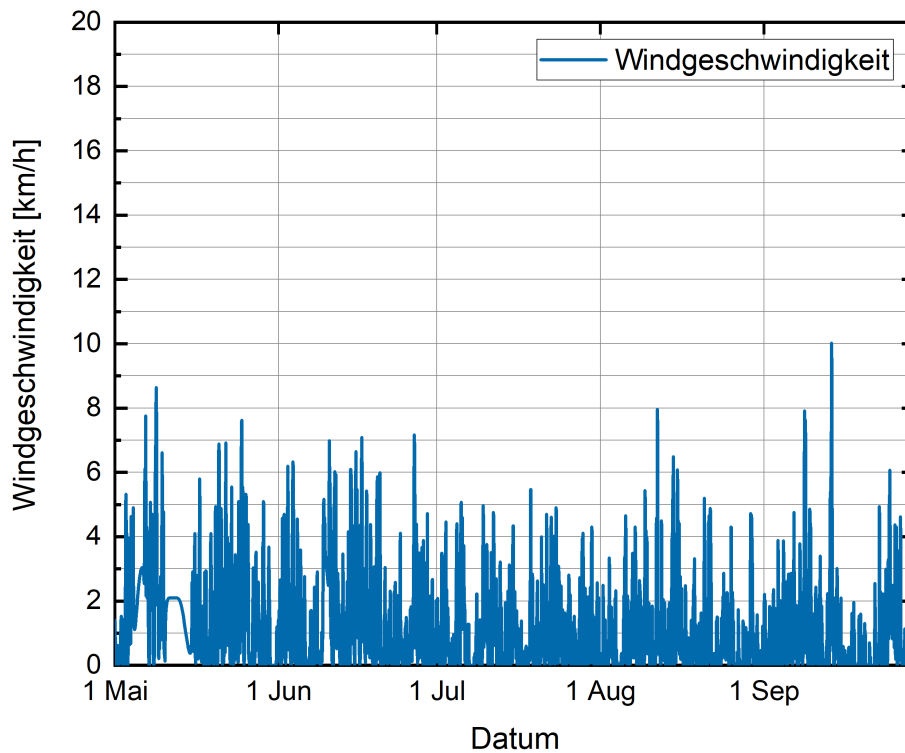


Abb. 2-6 In der zweiten Projektphase gemessene Windgeschwindigkeit

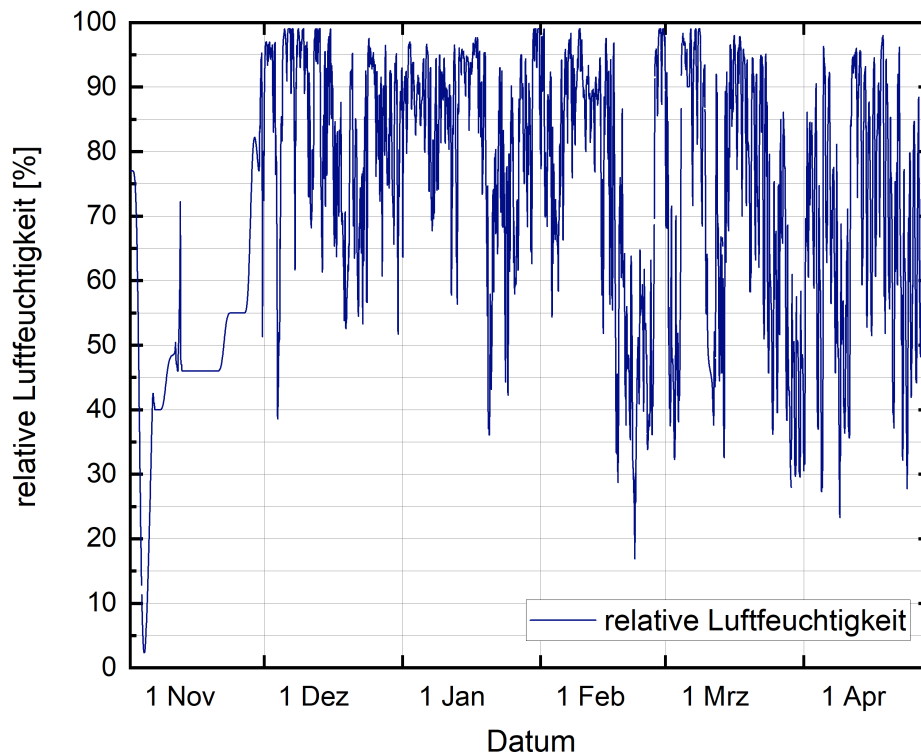


Abb. 2-7 In der ersten Projektphase gemessene relative Luftfeuchtigkeit [%]

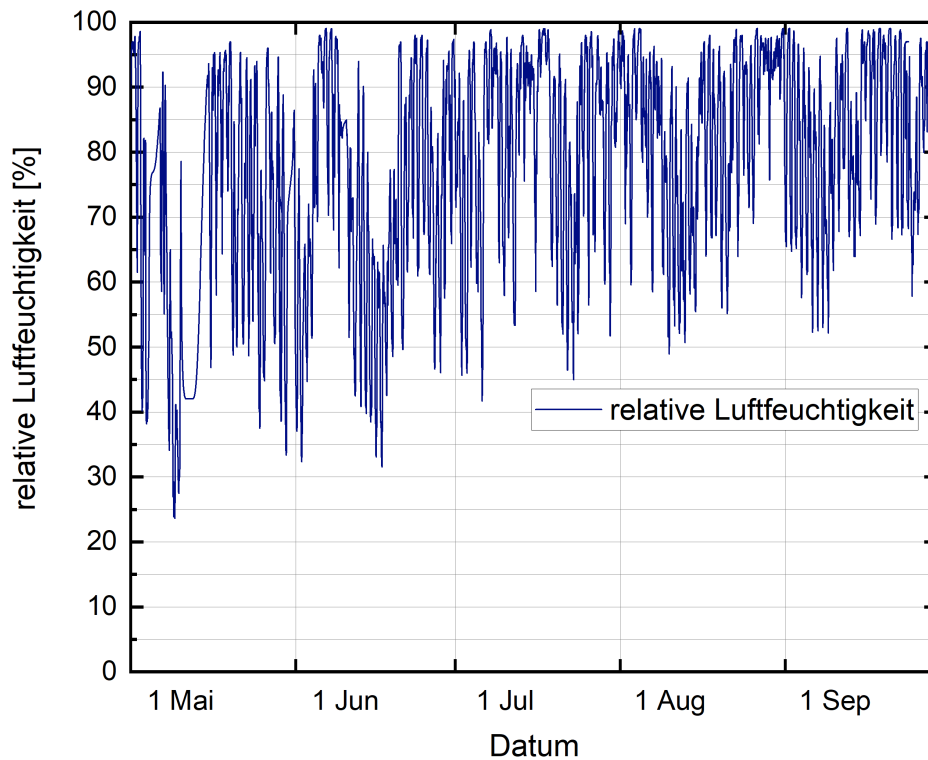


Abb. 2-8 In der zweiten Projektphase gemessene relative Luftfeuchtigkeit [%]

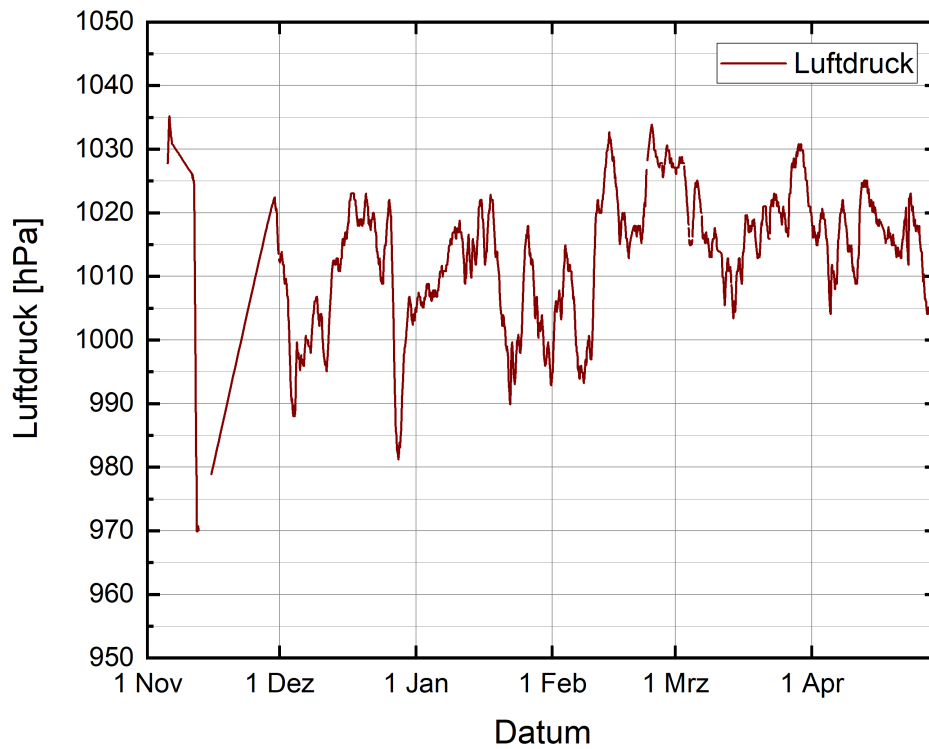


Abb. 2-9 In der ersten Projektphase gemessener Luftdruck

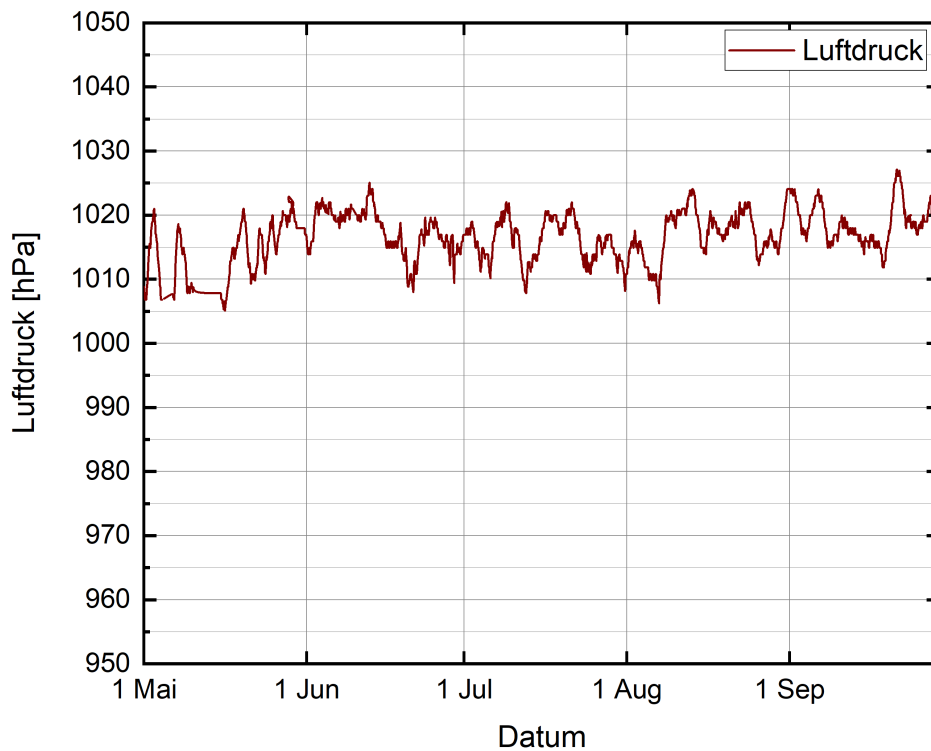


Abb. 2-10 In der zweiten Projektphase gemessener Luftdruck

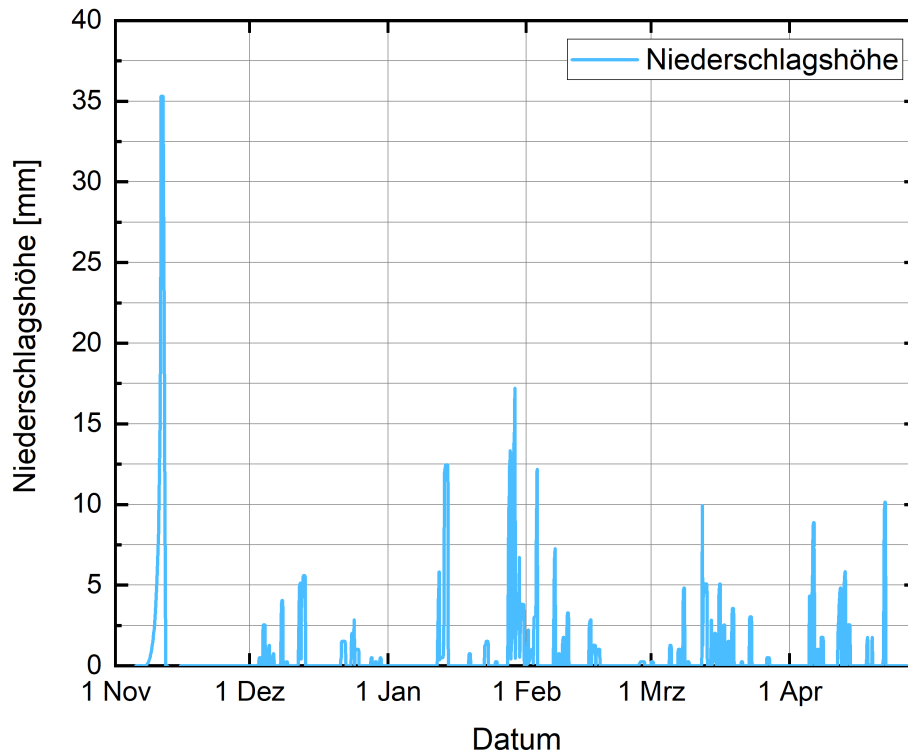


Abb. 2-11 In der ersten Projektphase gemessene Niederschlagshöhe

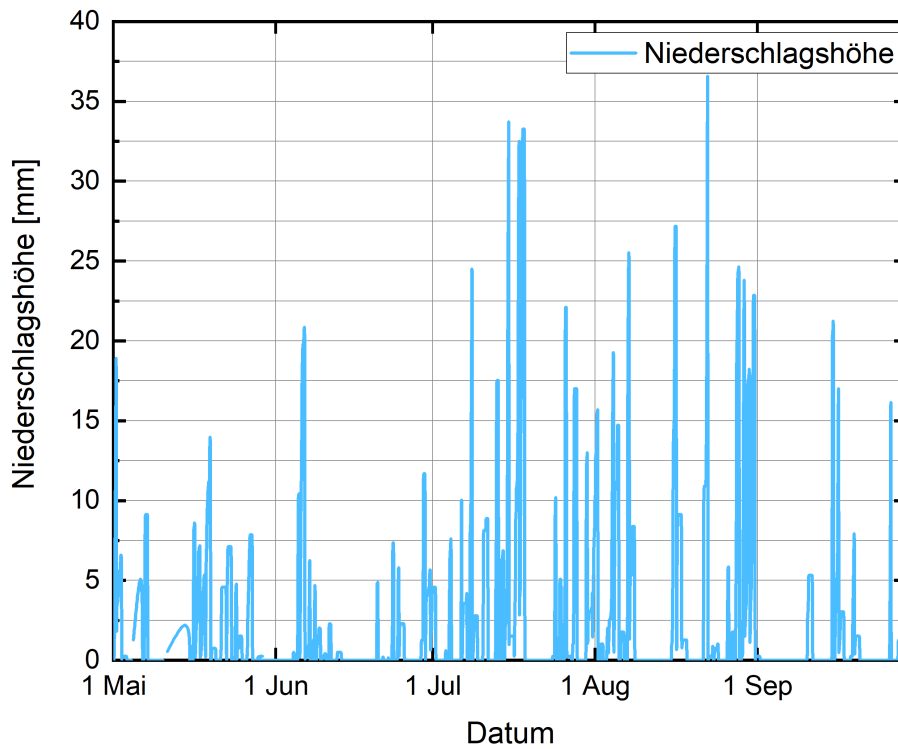
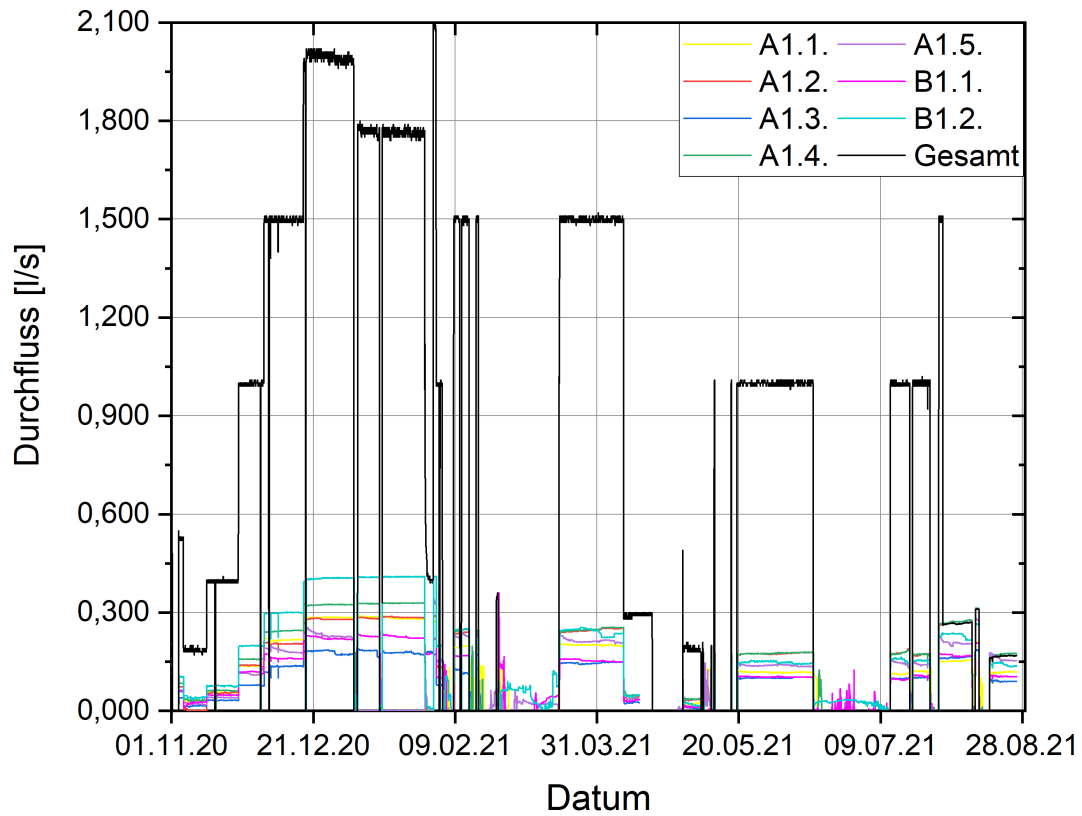


Abb. 2-12 In der zweiten Projektphase gemessene Niederschlagshöhe





## 2.2 Strömungsmessungen über den bisherigen Projektzeitraum



**Abb. 2-13** Strömungsmessungen des Gesamtsystems und der einzelnen Felder über bisherige Projektzeit



### 2.3 Temperaturmessungen in den Testflächen

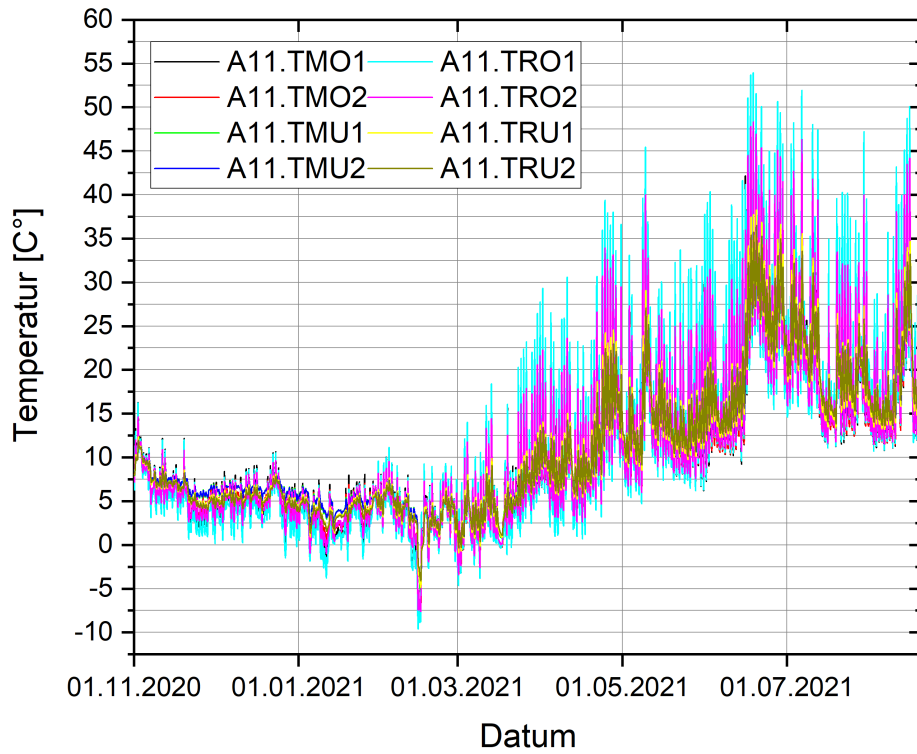


Abb. 2-14 Testfeld A1.1, Temperaturmessung über den bisherigen Projektzeitraum

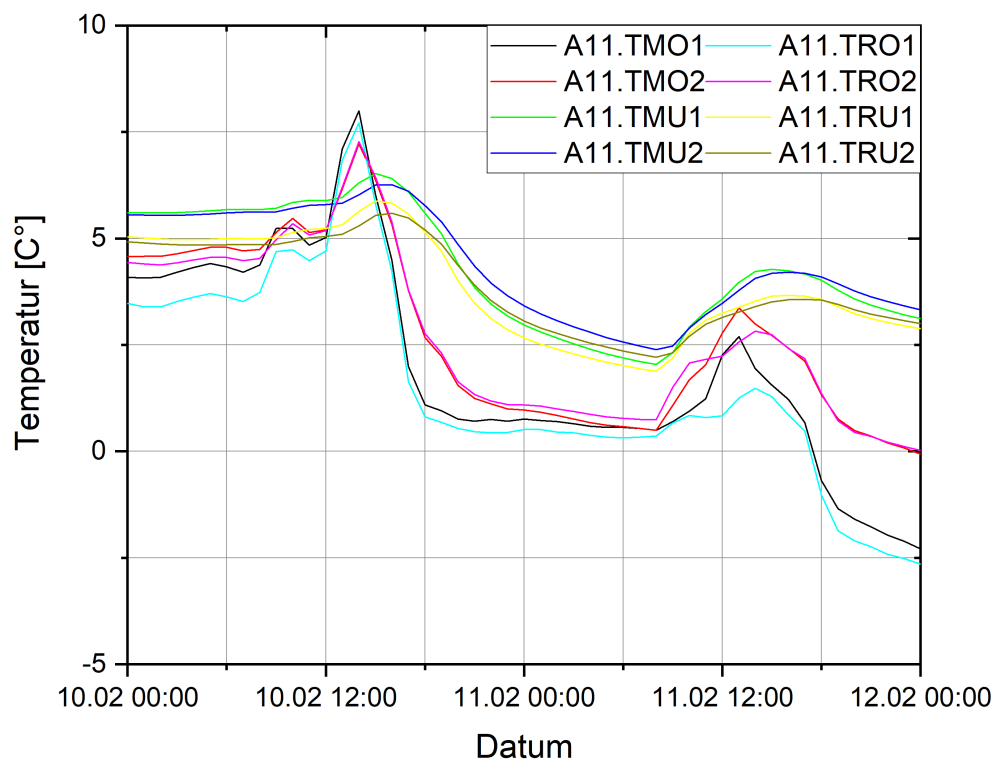


Abb. 2-15 Testfeld A1.1, Temperaturmessung während Schneezszenario

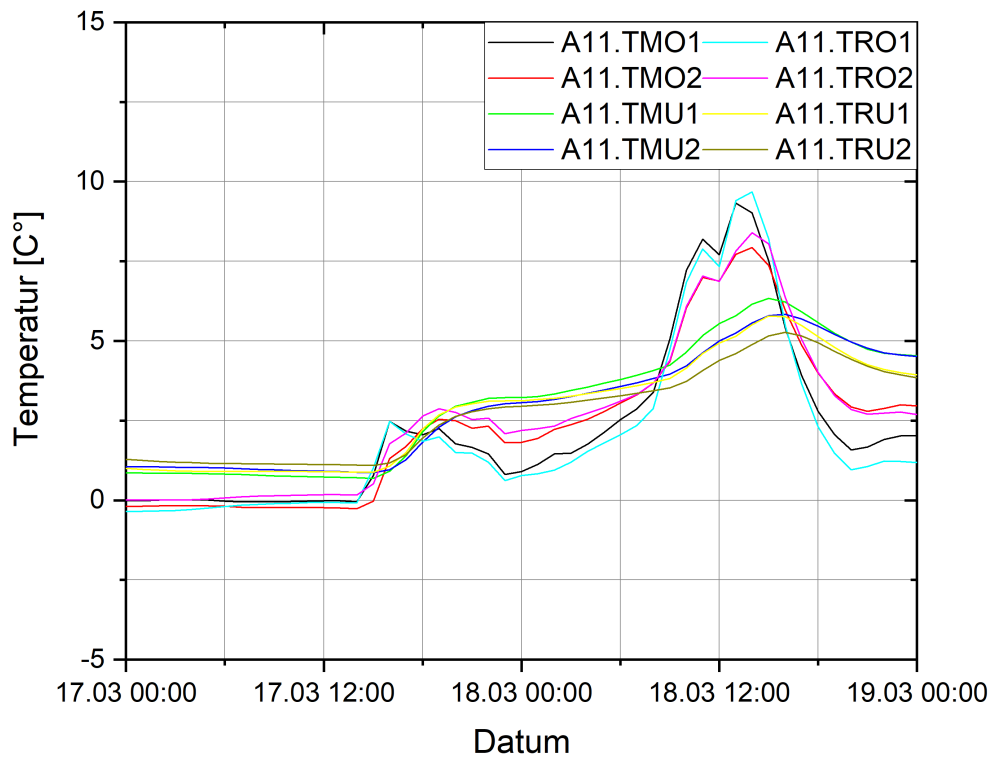


Abb. 2-16 Testfeld A1.1, Temperaturmessung während winterlichen Trägheitsszenario

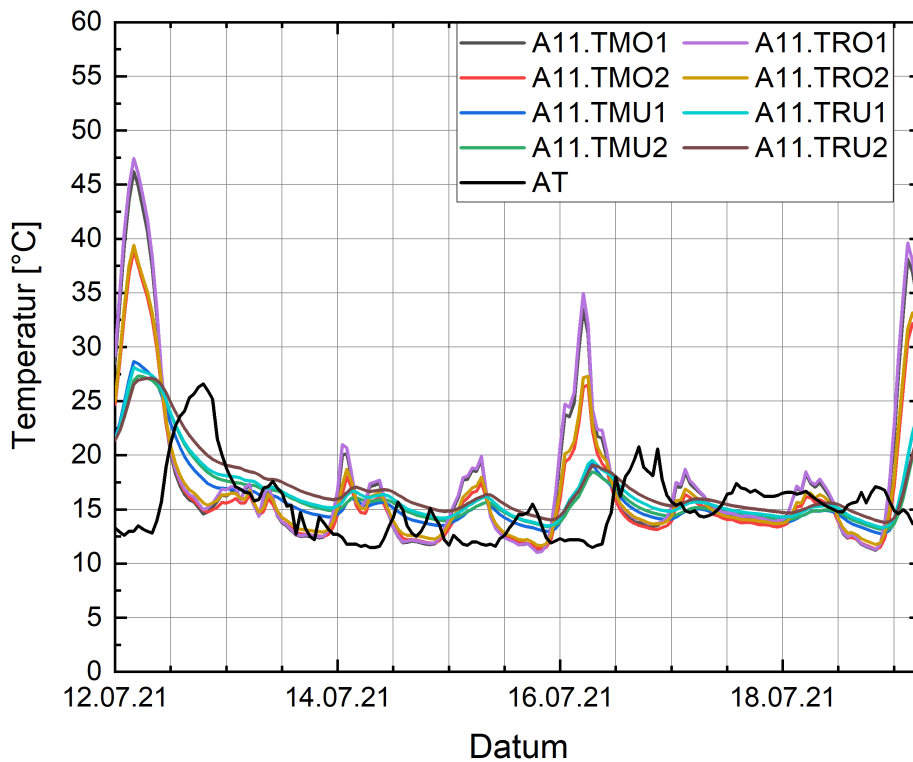


Abb. 2-17 Testfeld A1.1, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario

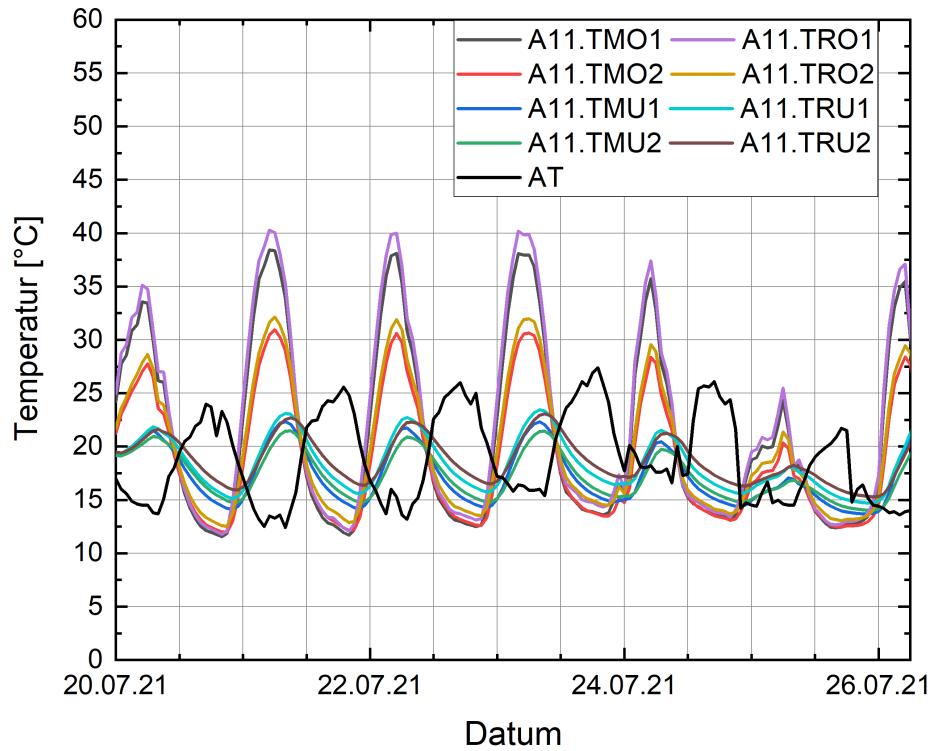


Abb. 2-18 Testfeld A1.1, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetriebs

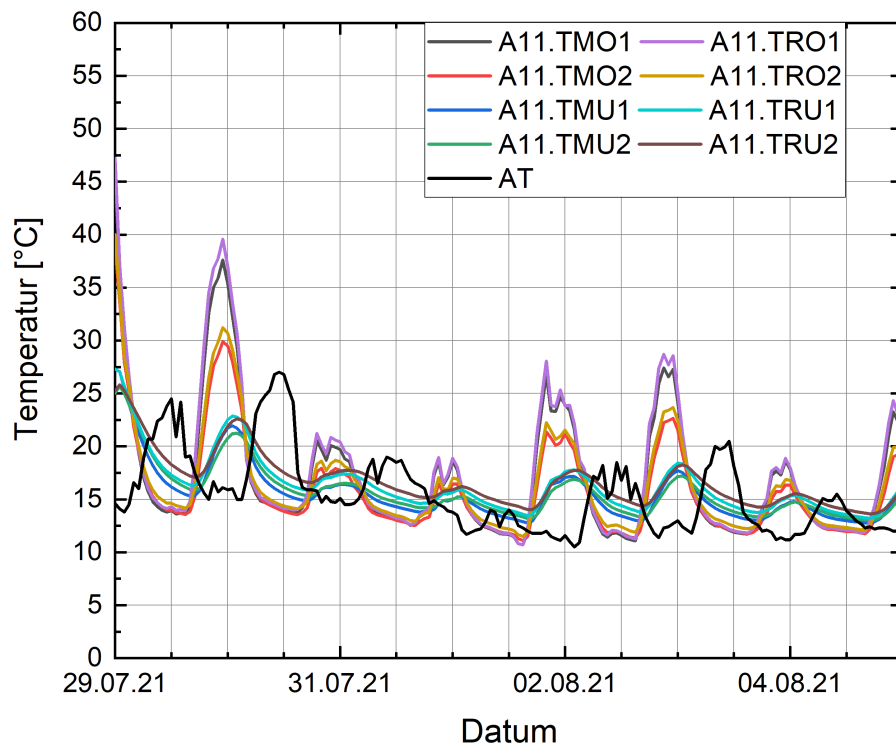


Abb. 2-19 Testfeld A1.1, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetriebs

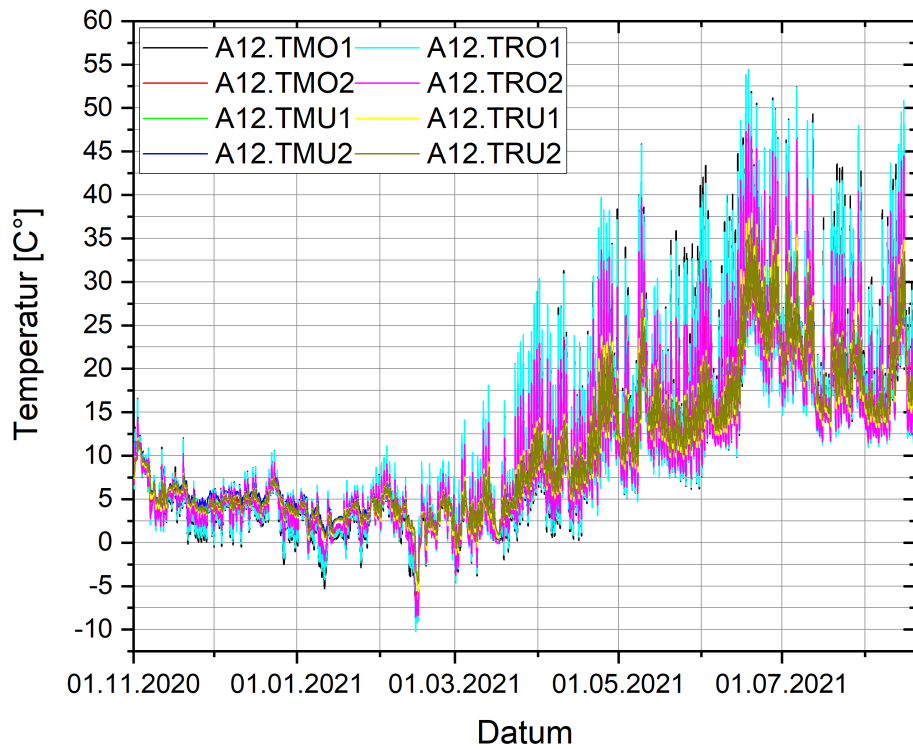


Abb. 2-20 Testfeld A1.2, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum

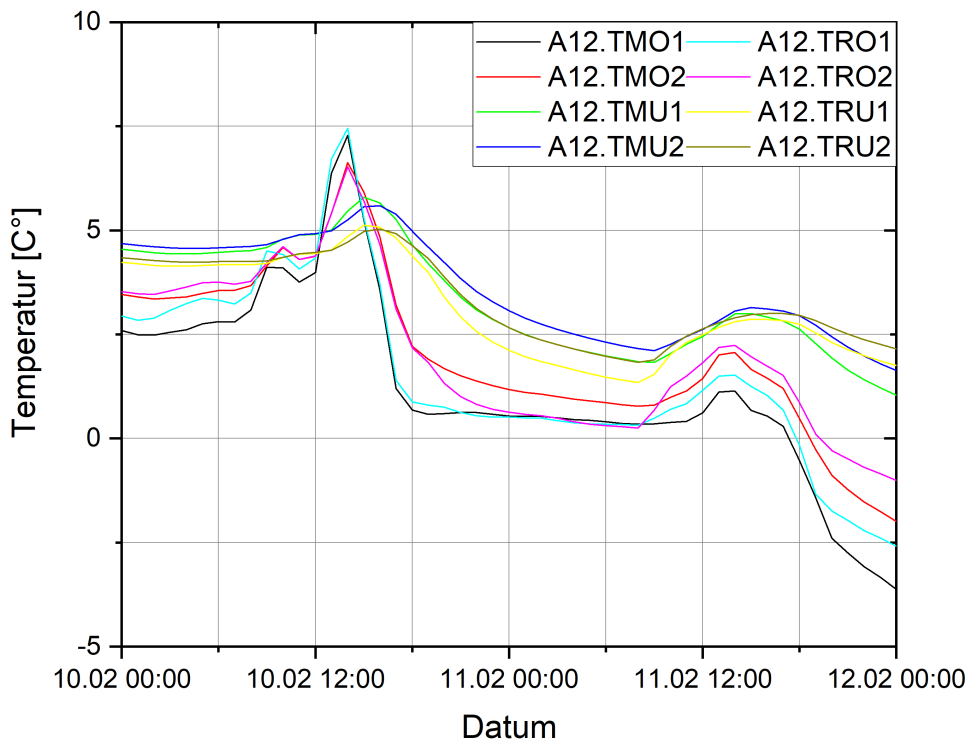


Abb. 2-21 Testfeld A1.2, Temperaturmessung während Schneezszenario

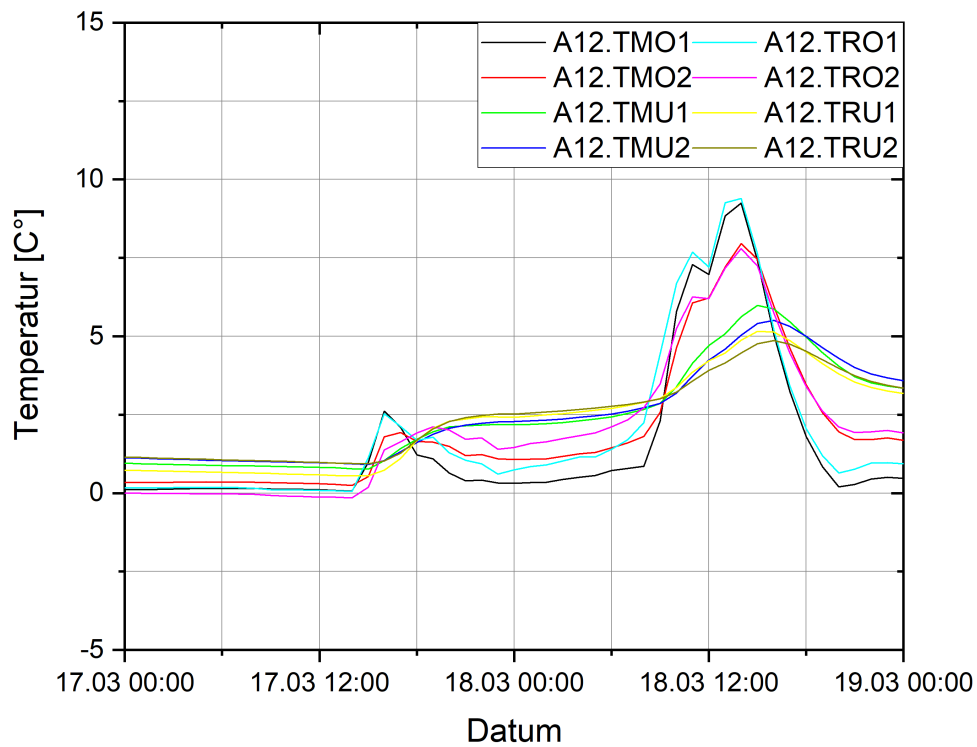


Abb. 2-22 Testfeld A1.2, Temperaturmessung während winterlichen Trägheitsszenario

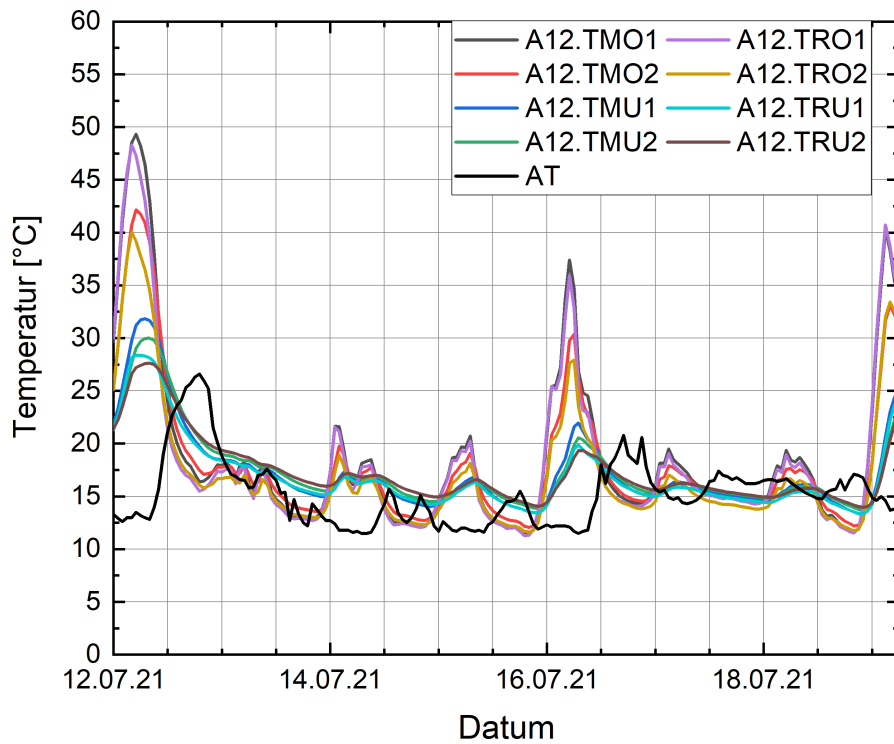


Abb. 2-23 Testfeld A1.2, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario

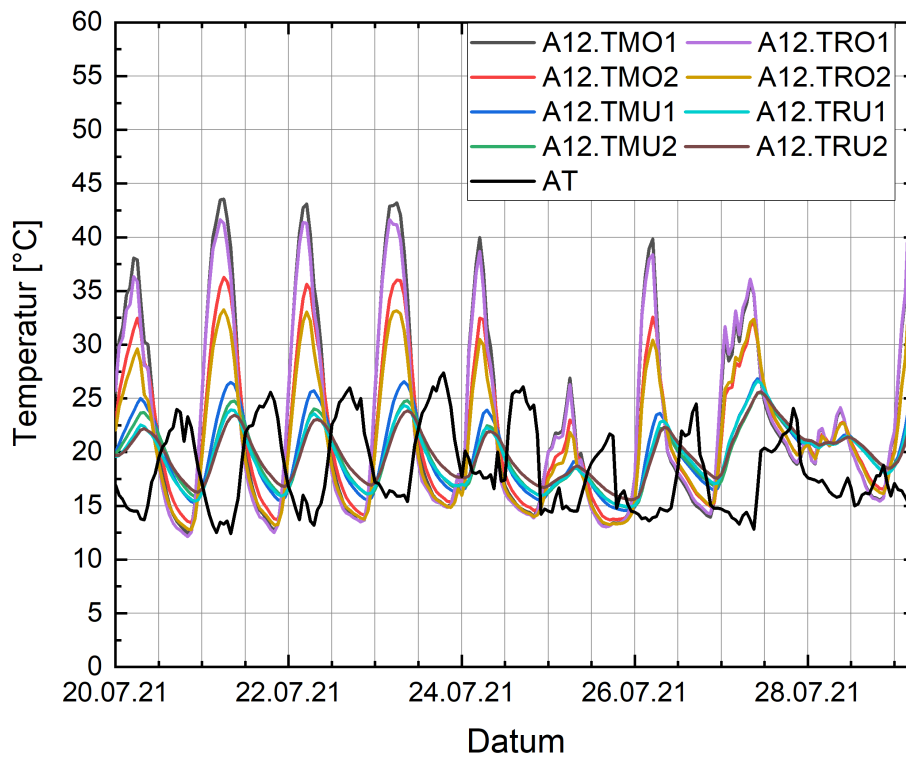


Abb. 2-24 Testfeld A1.2, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb

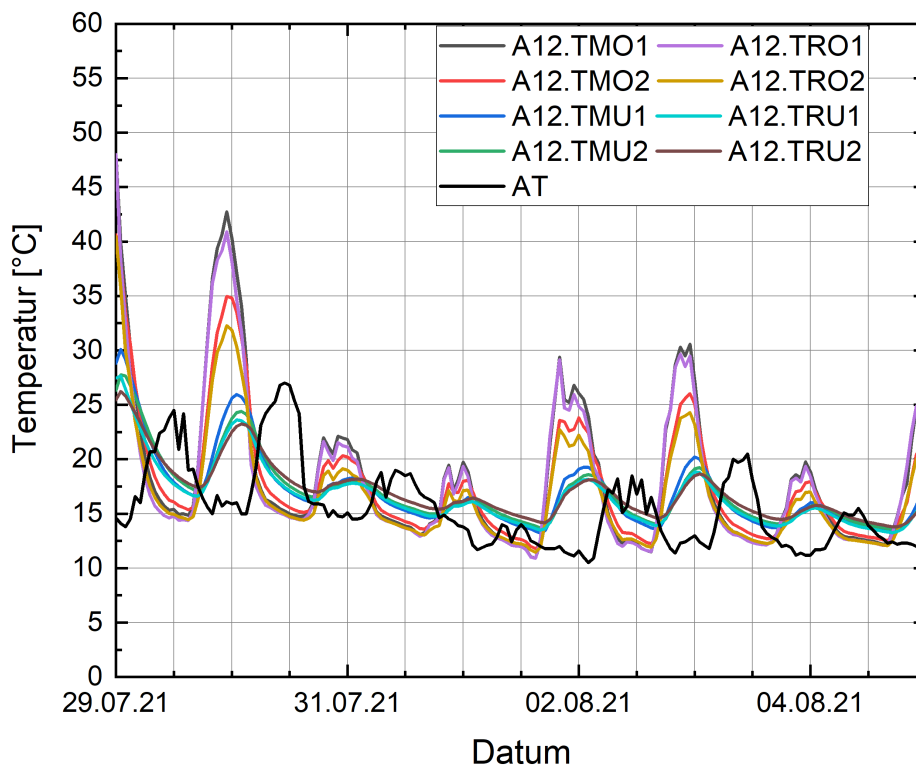


Abb. 2-25 Testfeld A1.2, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb

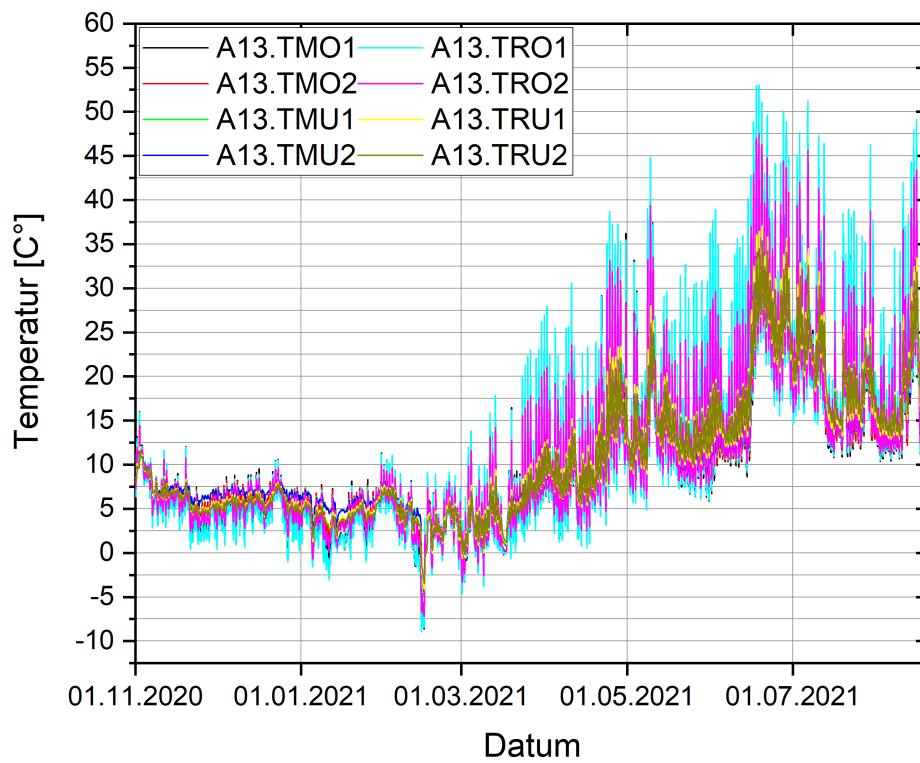


Abb. 2-26 Testfeld A1.3, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum

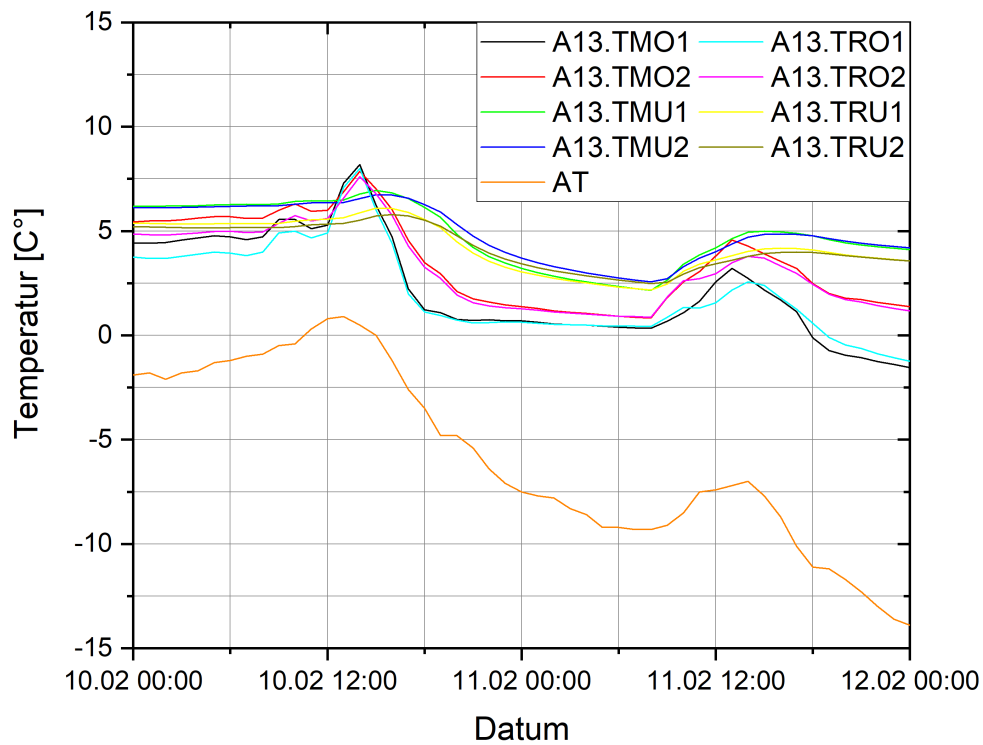


Abb. 2-27 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Schneeszenario



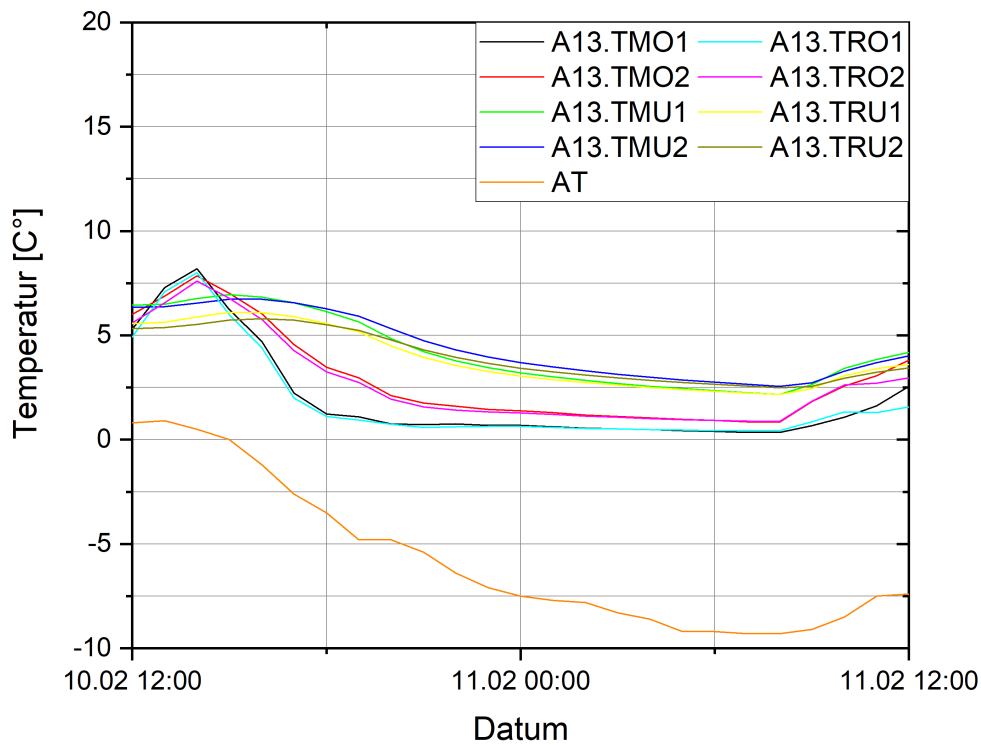


Abb. 2-28 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Schneezszenario

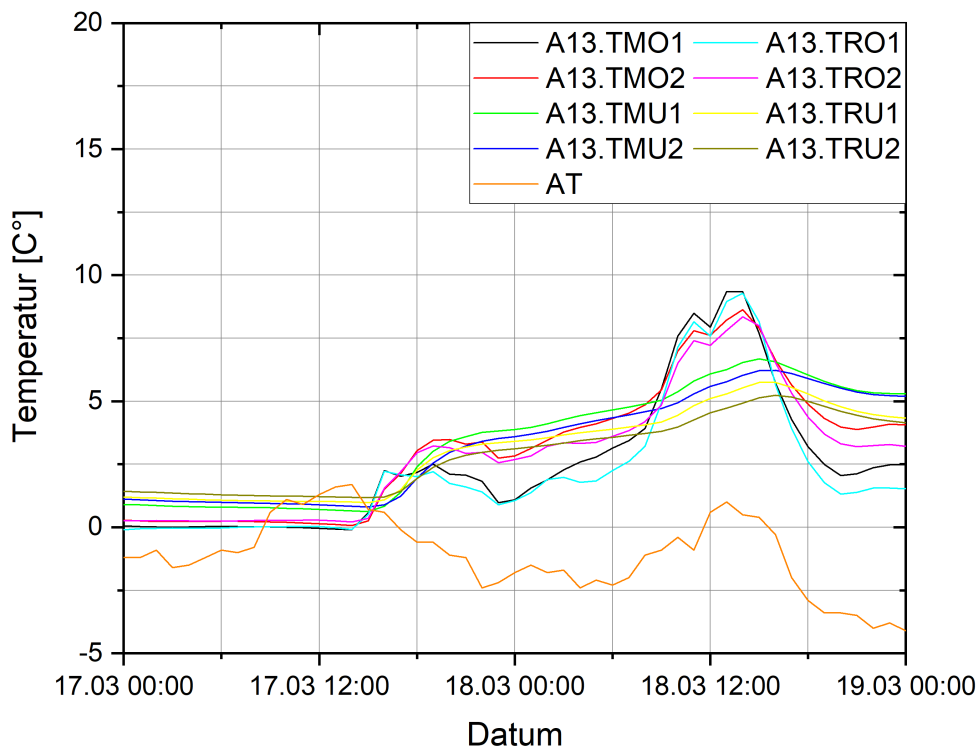


Abb. 2-29 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Trägheitsszenario

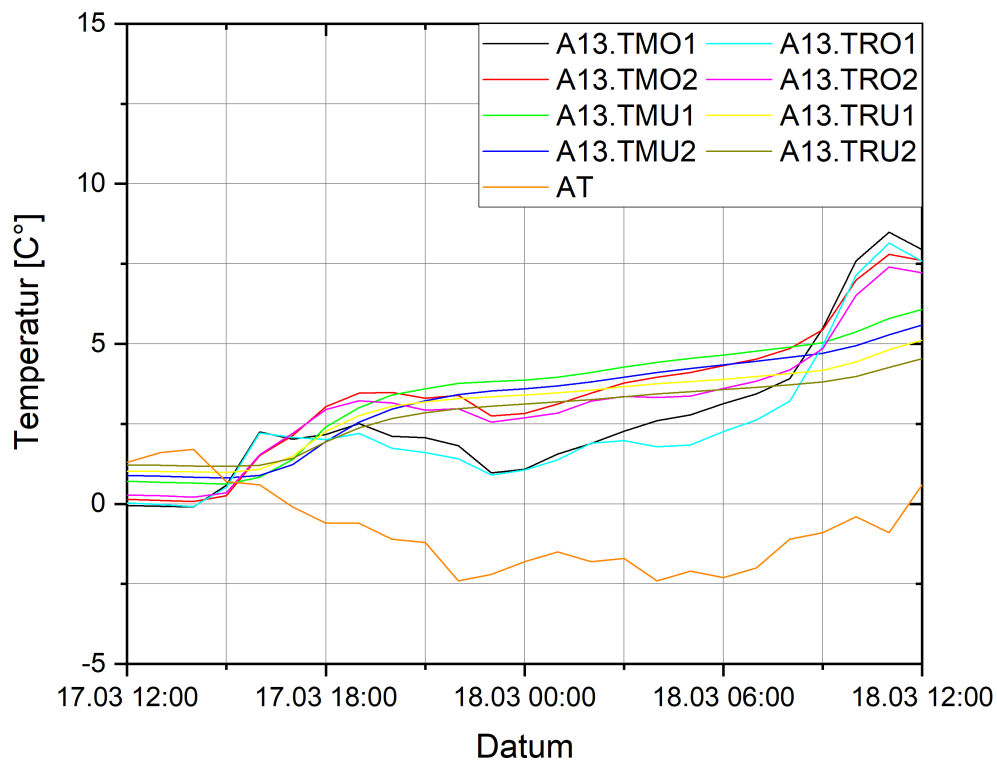


Abb. 2-30 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während Trägheitsszenario

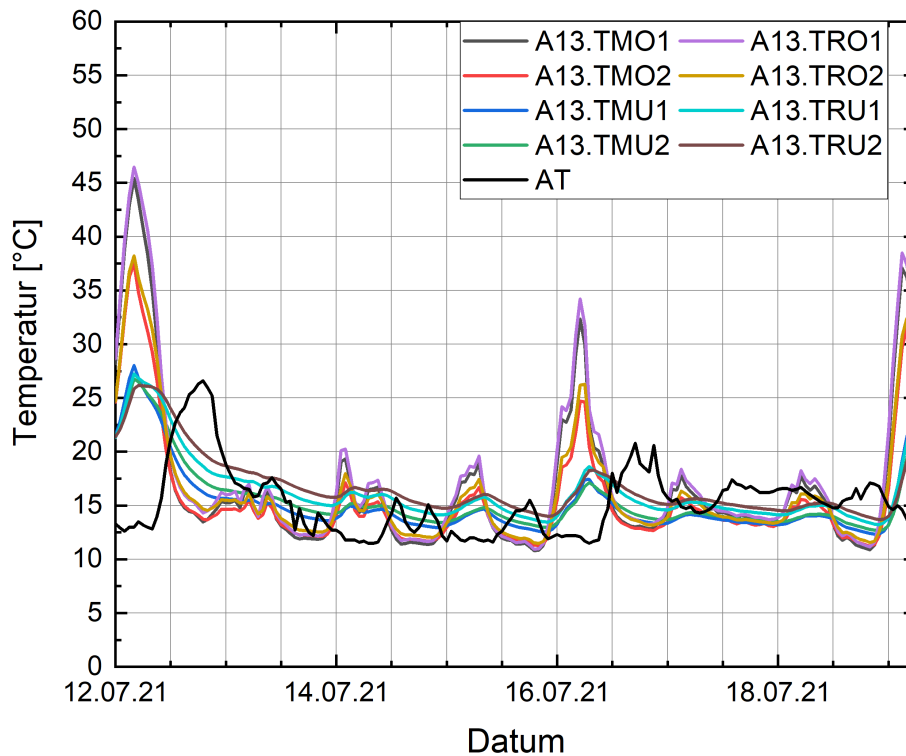


Abb. 2-31 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario

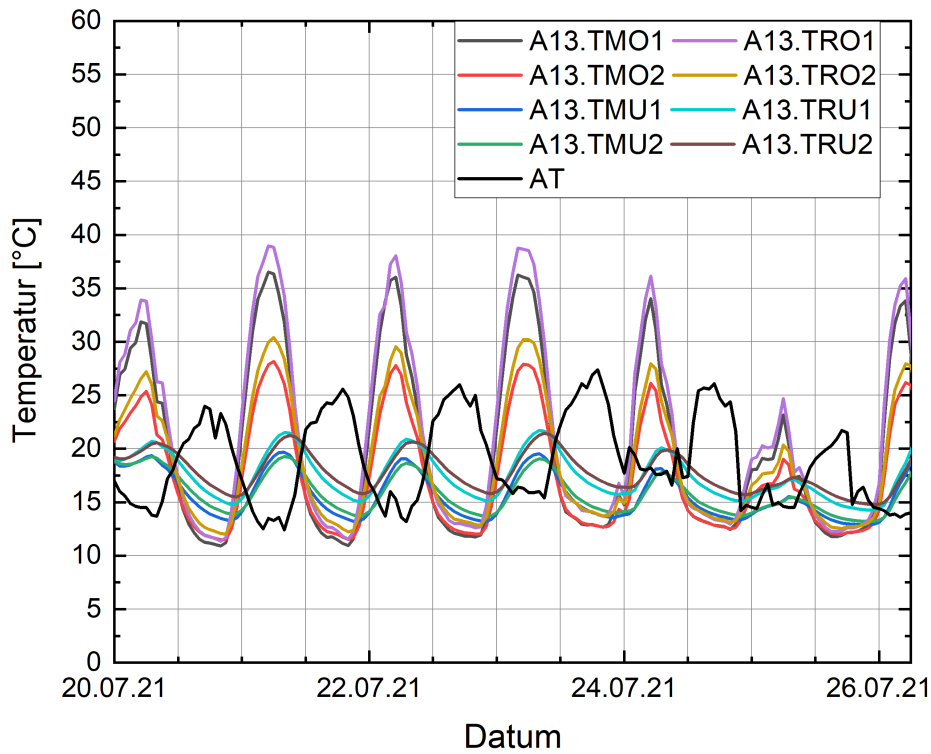


Abb. 2-32 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb

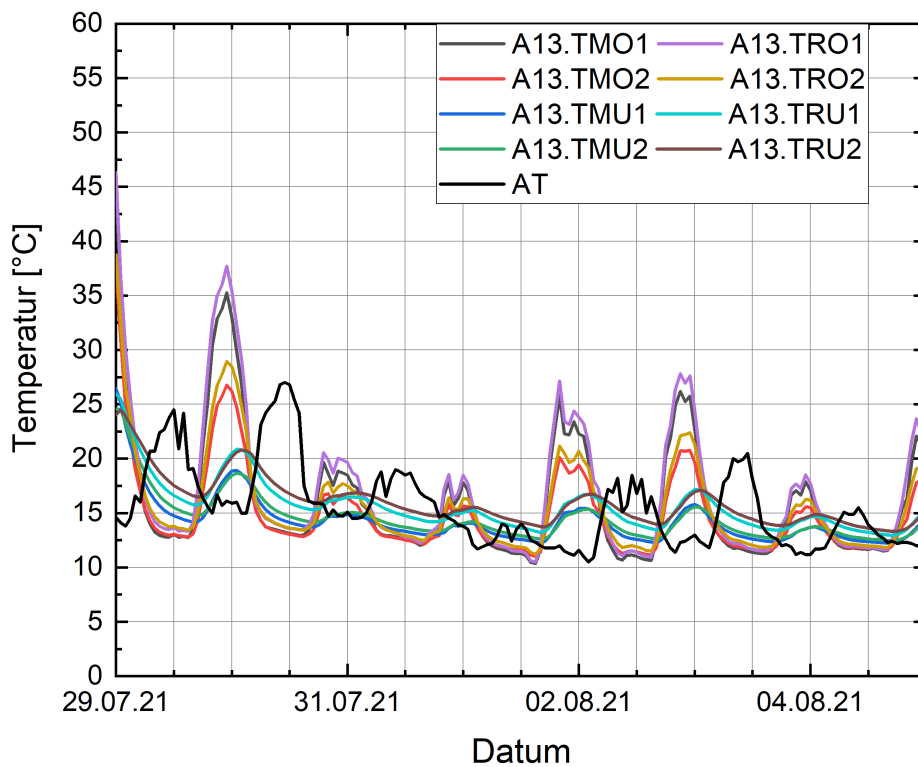


Abb. 2-33 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb

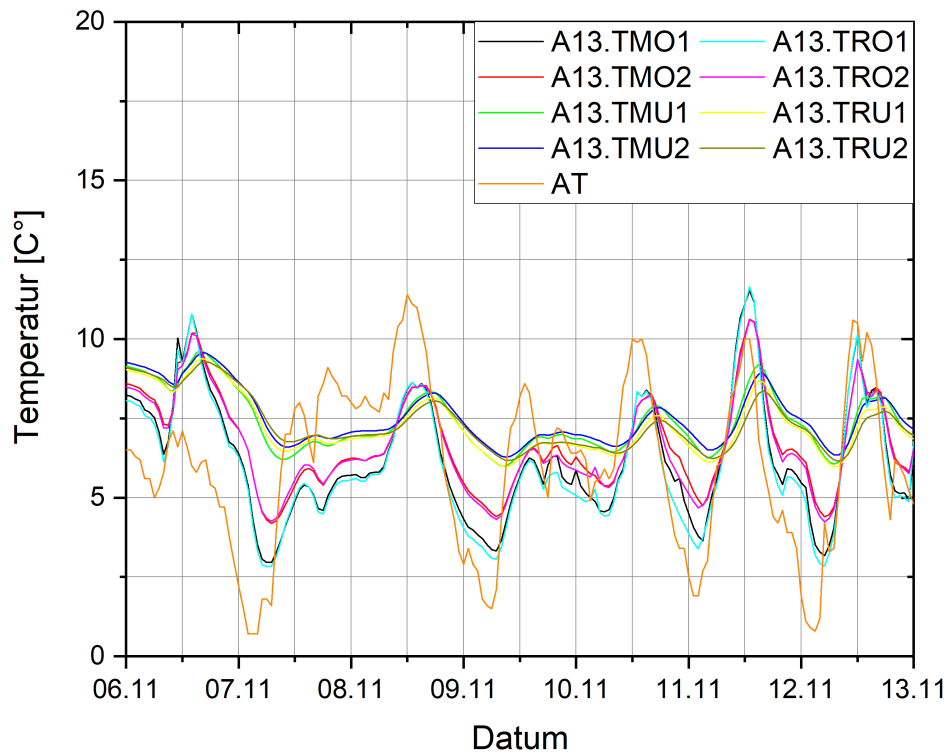


Abb. 2-34 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während laminarer Durchströmung

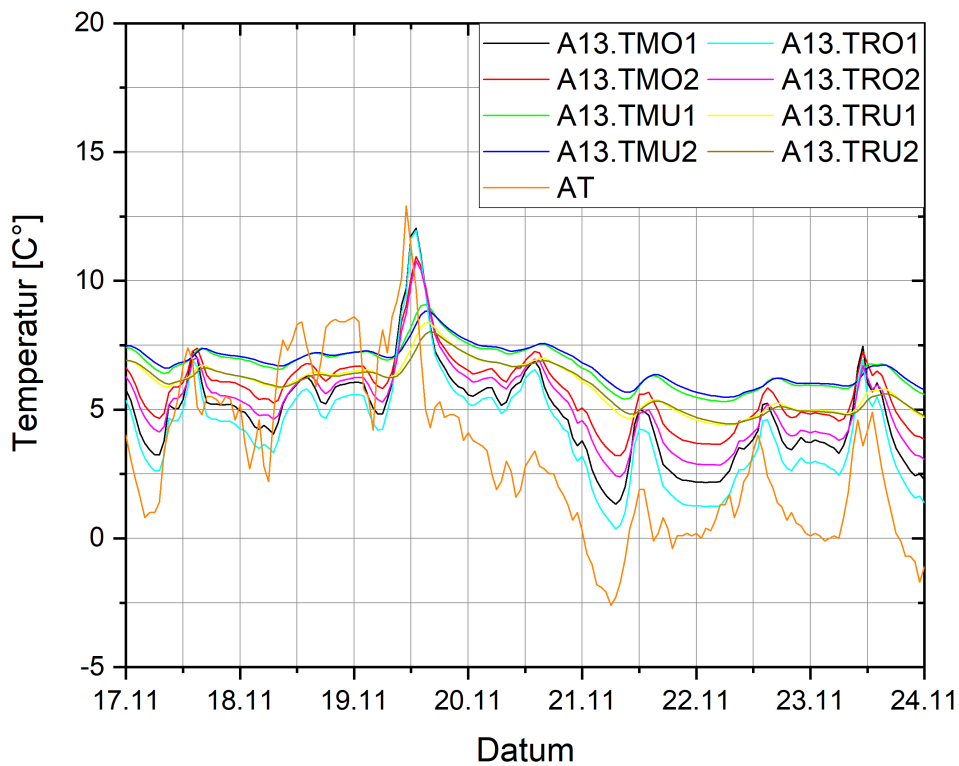


Abb. 2-35 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während turbulenter Durchströmung

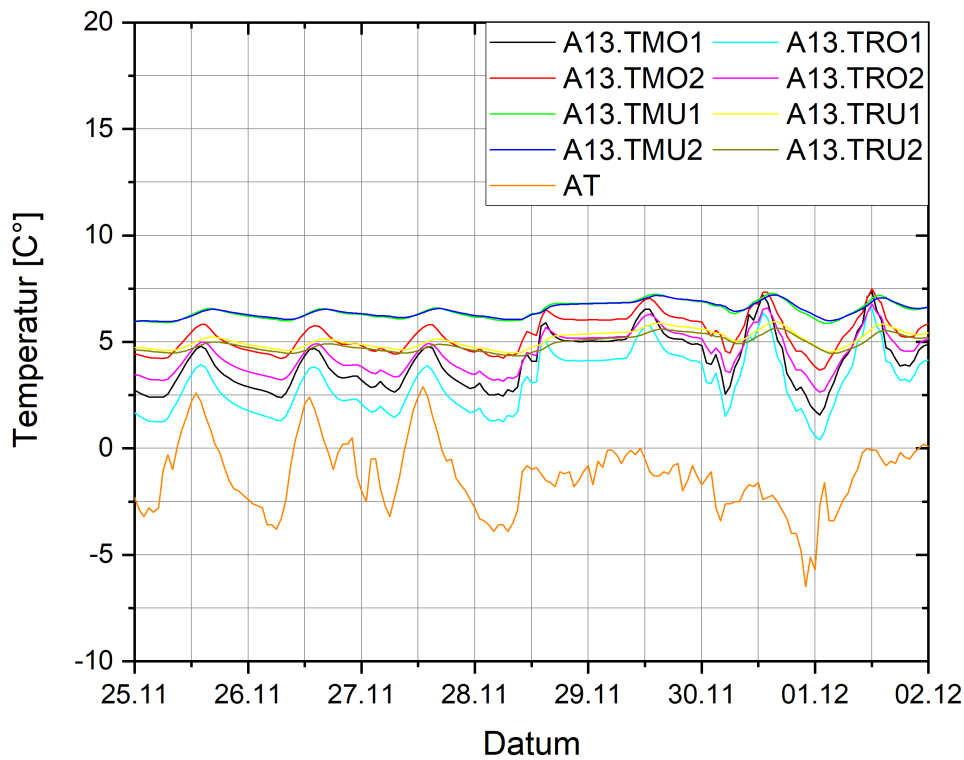


Abb. 2-36 Testfeld A1.3, Temperaturmessung während hochturbulenter Durchströmung

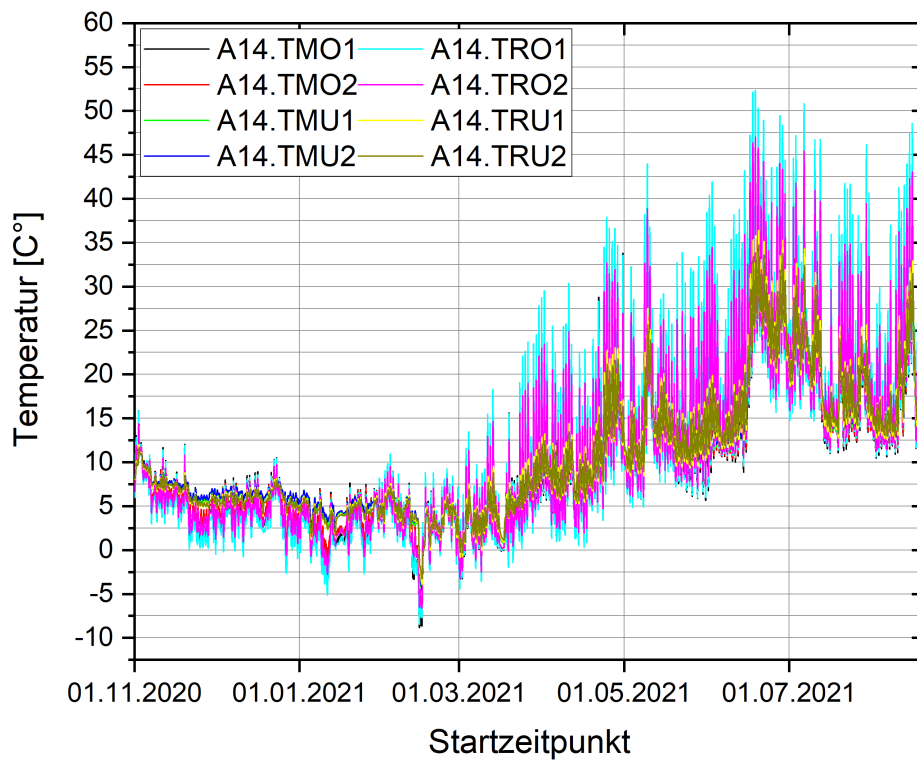


Abb. 2-37 Testfeld A1.4, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum

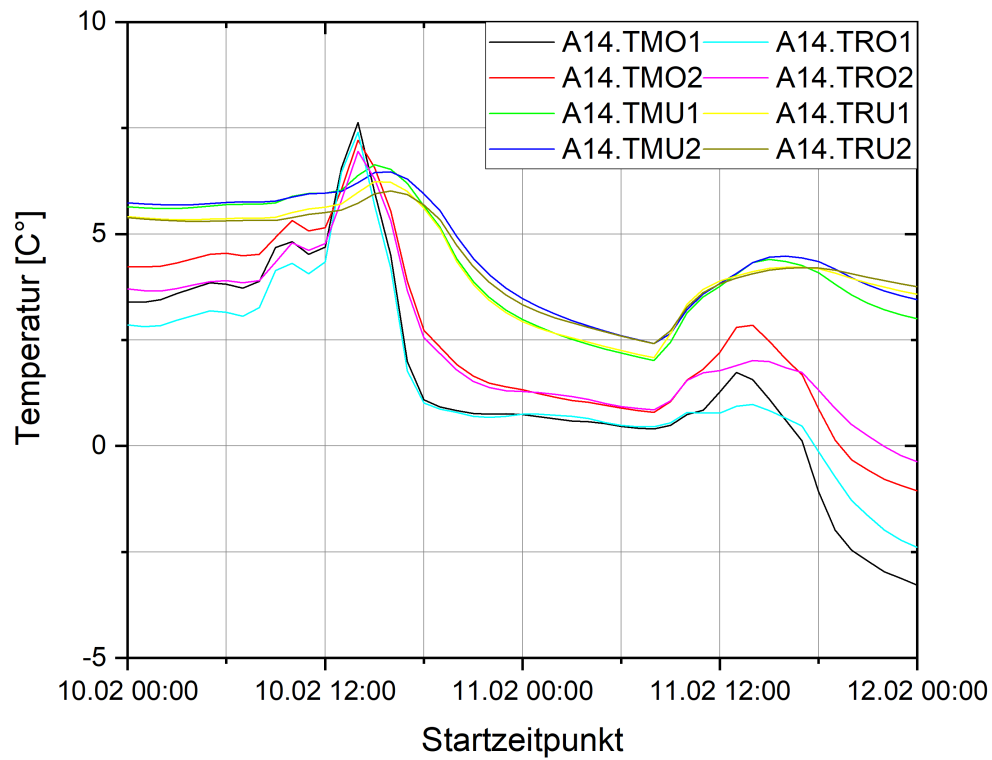


Abb. 2-38 Testfeld A1.4, Temperaturmessung während Schneezszenario

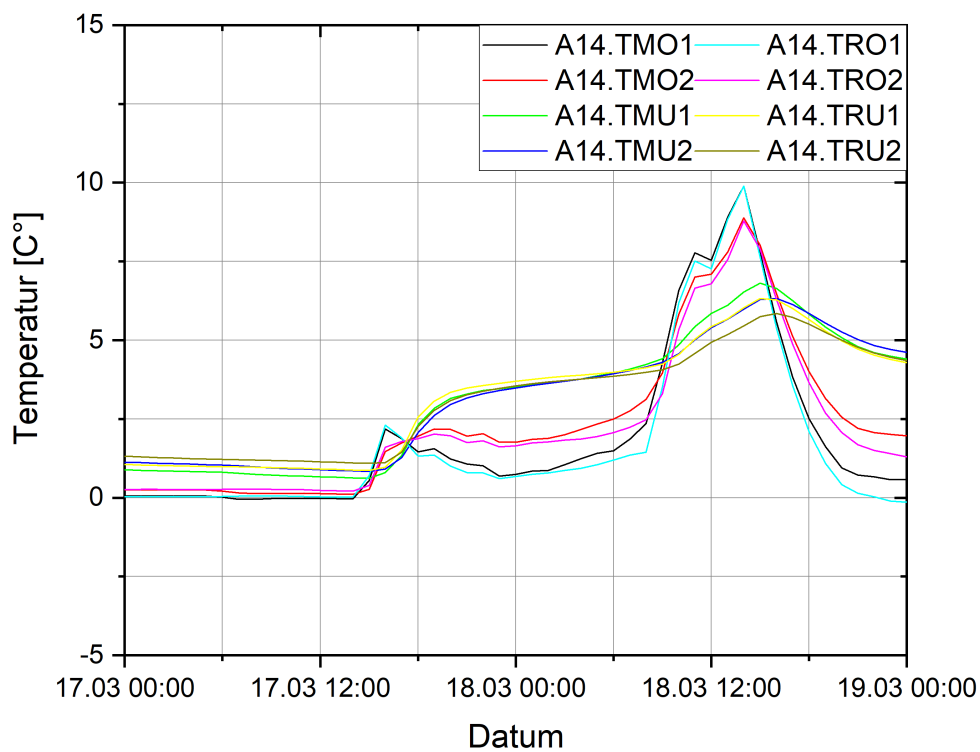


Abb. 2-39 Testfeld A1.4, Temperaturmessung während Trägheitsszenario

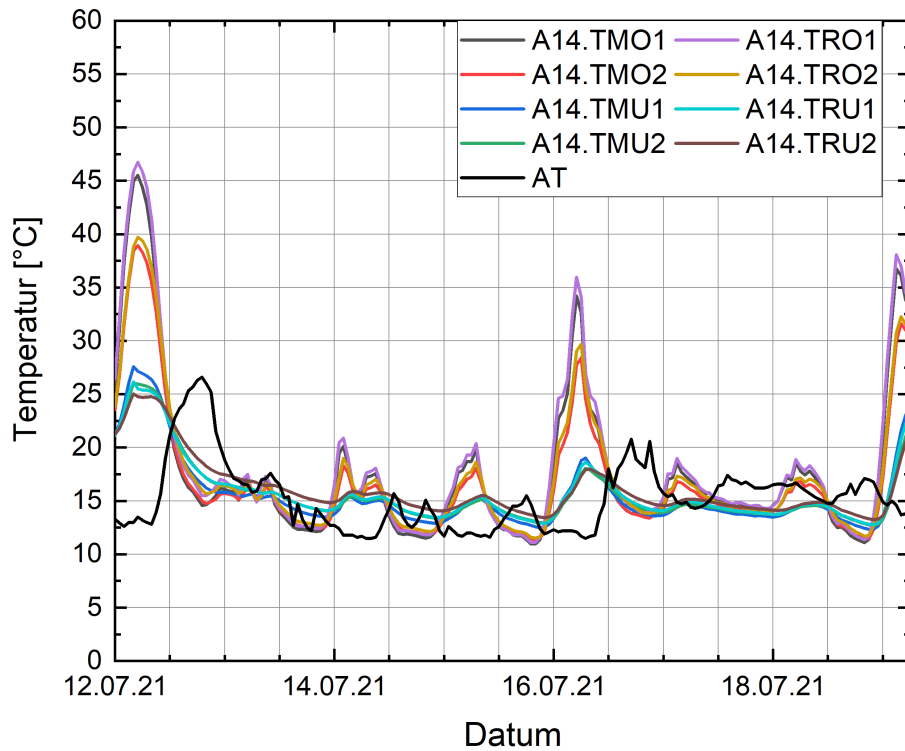


Abb. 2-40 Testfeld A1.4, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario

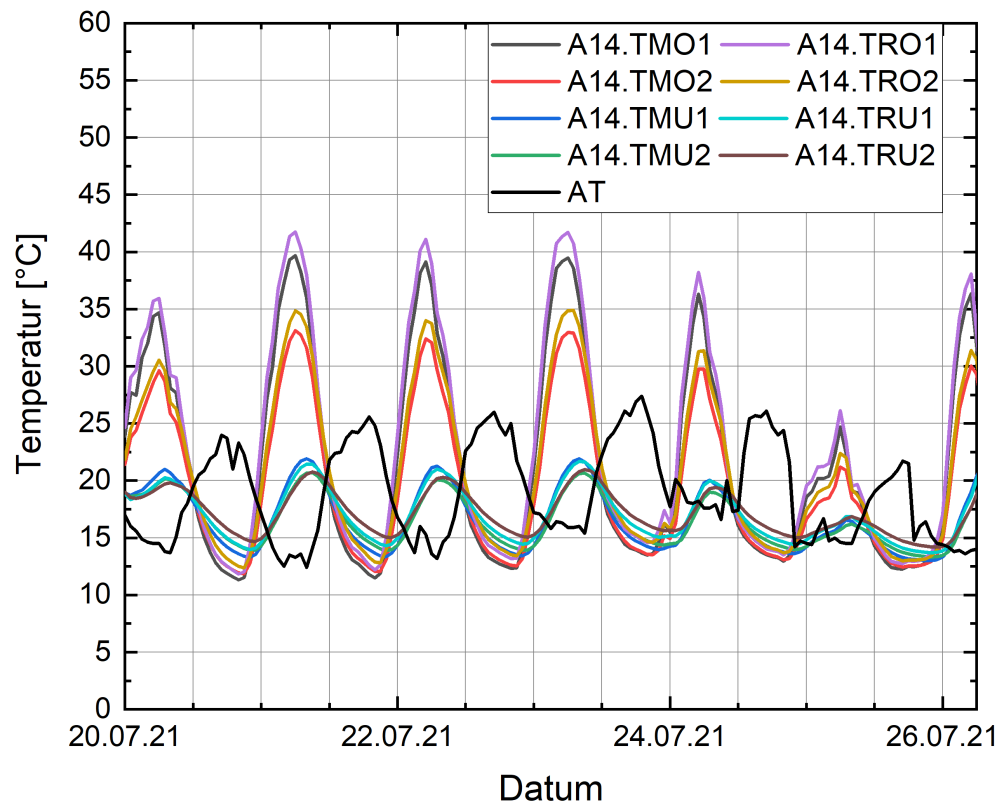


Abb. 2-41 Testfeld A1.4, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb

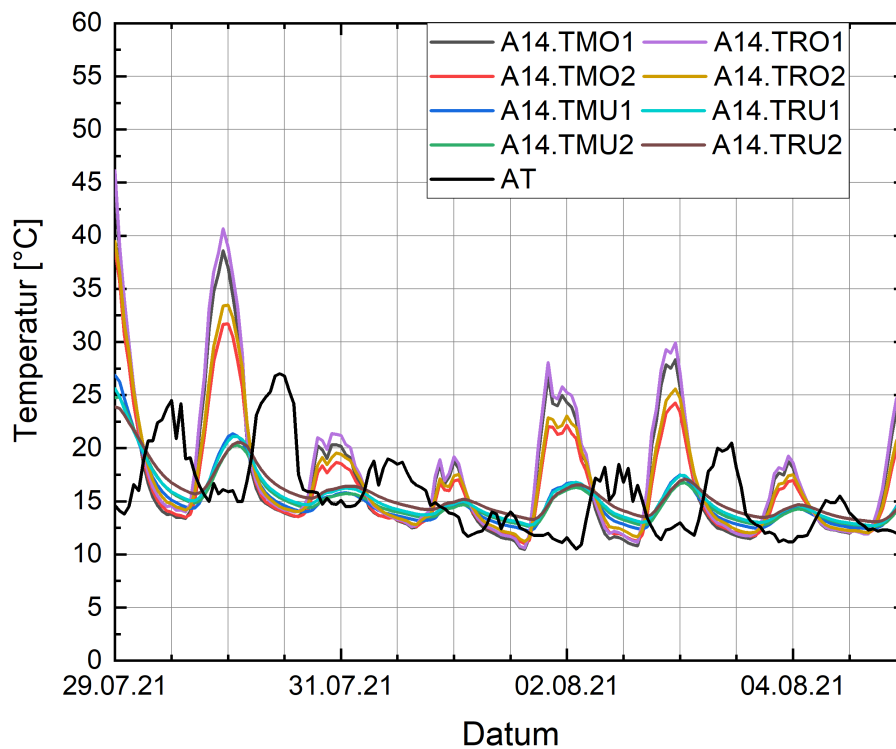


Abb. 2-42 Testfeld A1.4, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb

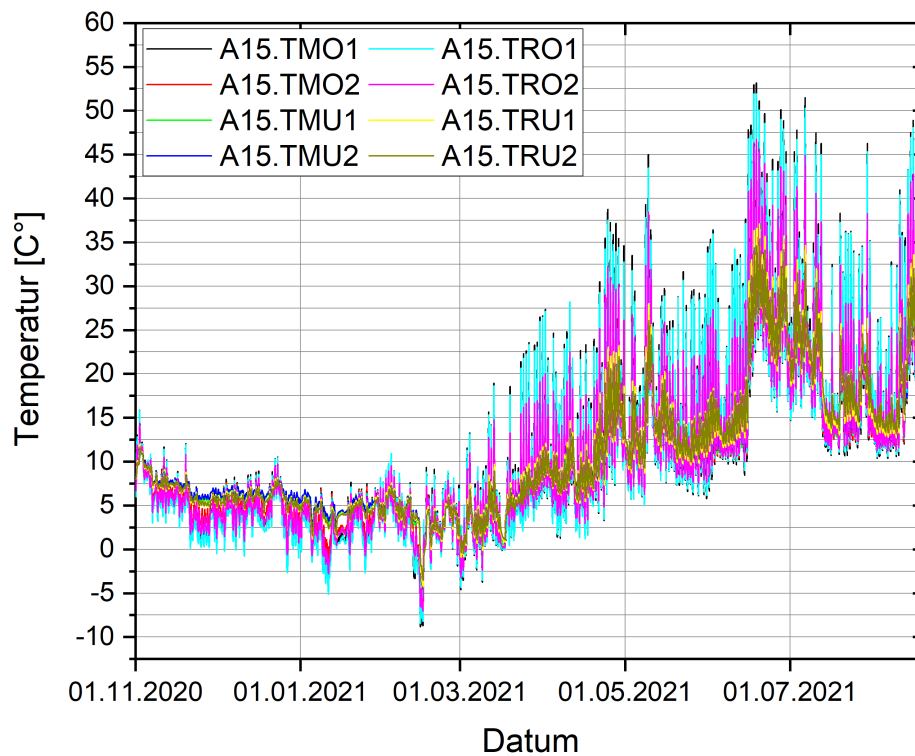


Abb. 2-43 Testfeld A1.5, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum



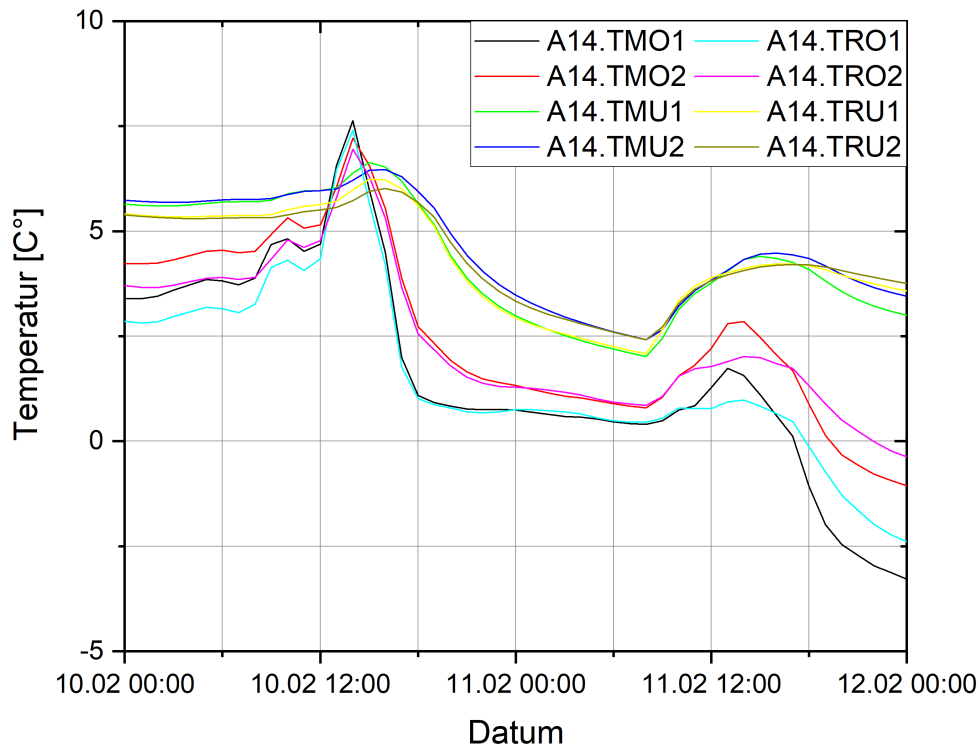


Abb. 2-44 Testfeld A1.4, Temperaturmessung während Schneezszenario

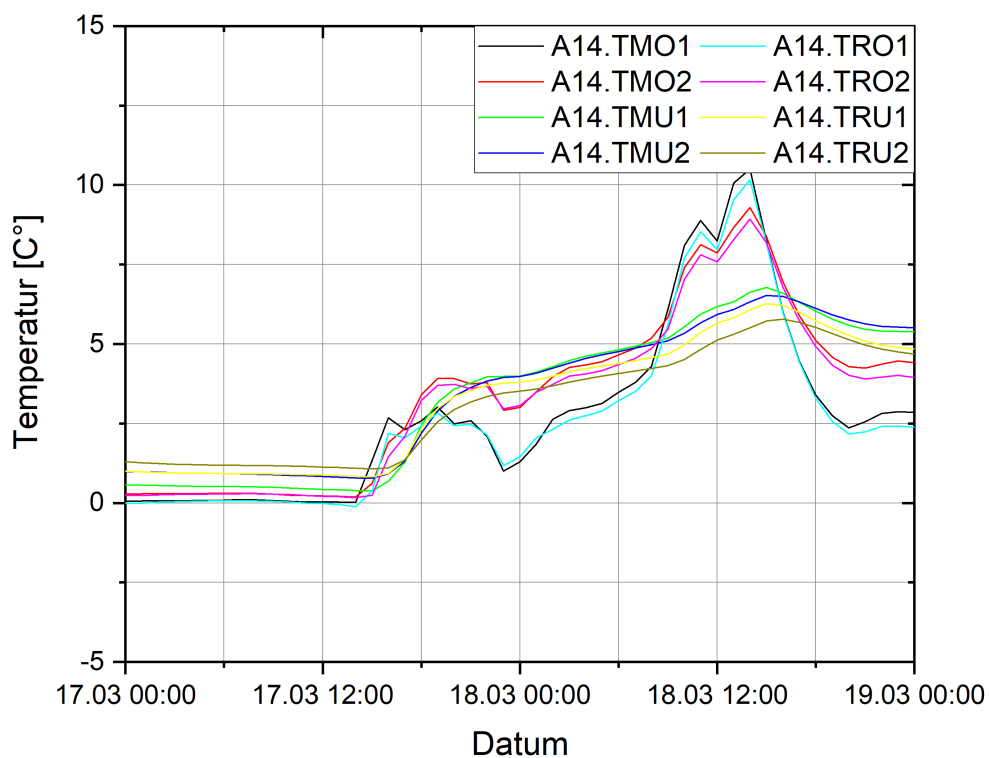


Abb. 2-45 Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während Trägheitsszenario

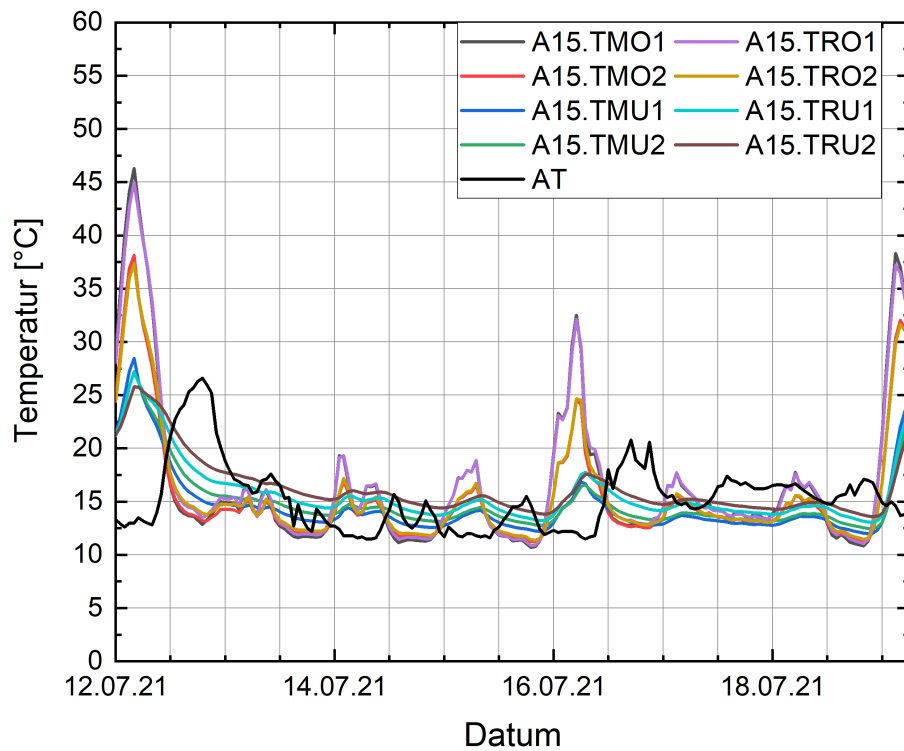


Abb. 2-46 Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während sommerlichen Trägheitsszenario

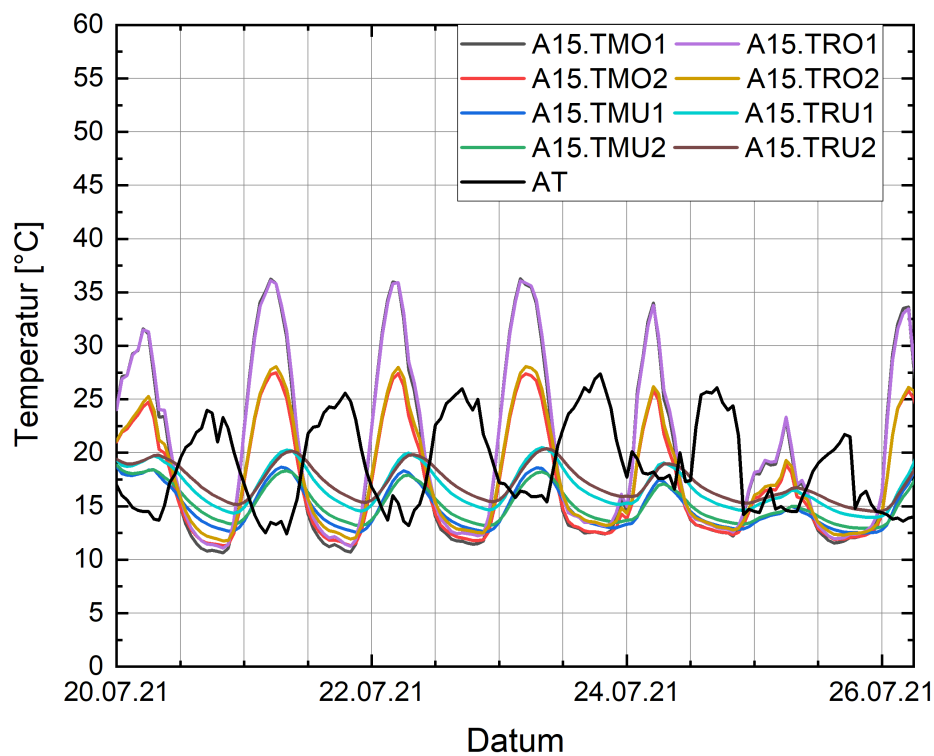


Abb. 2-47 Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während ersten sommerlichen Regelbetrieb

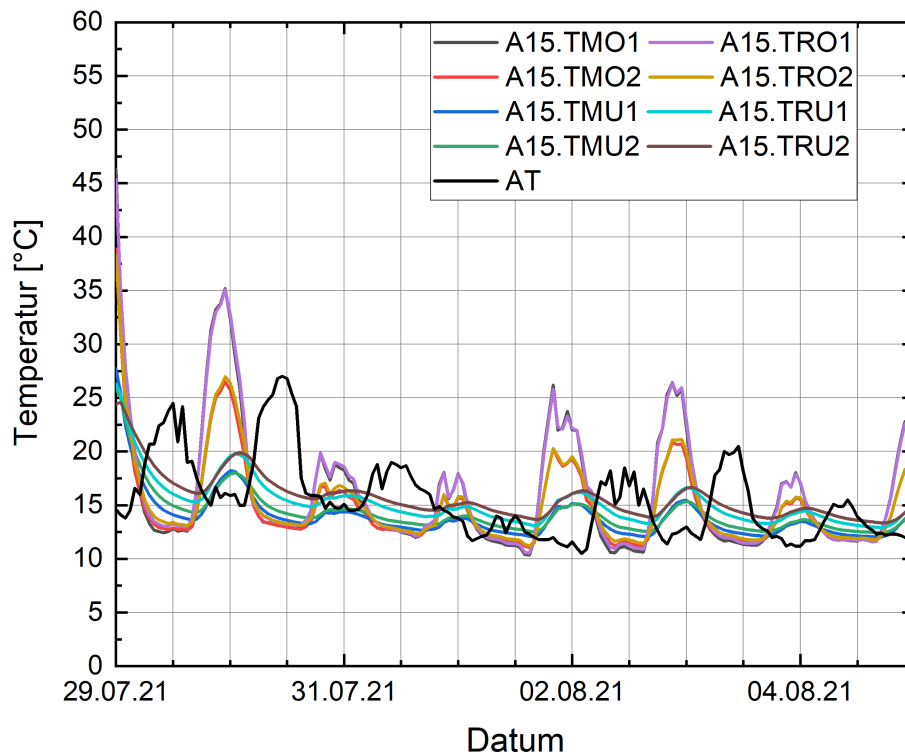


Abb. 2-48 Testfeld A1.4, Temperaturmessungen während zweiten sommerlichen Regelbetrieb

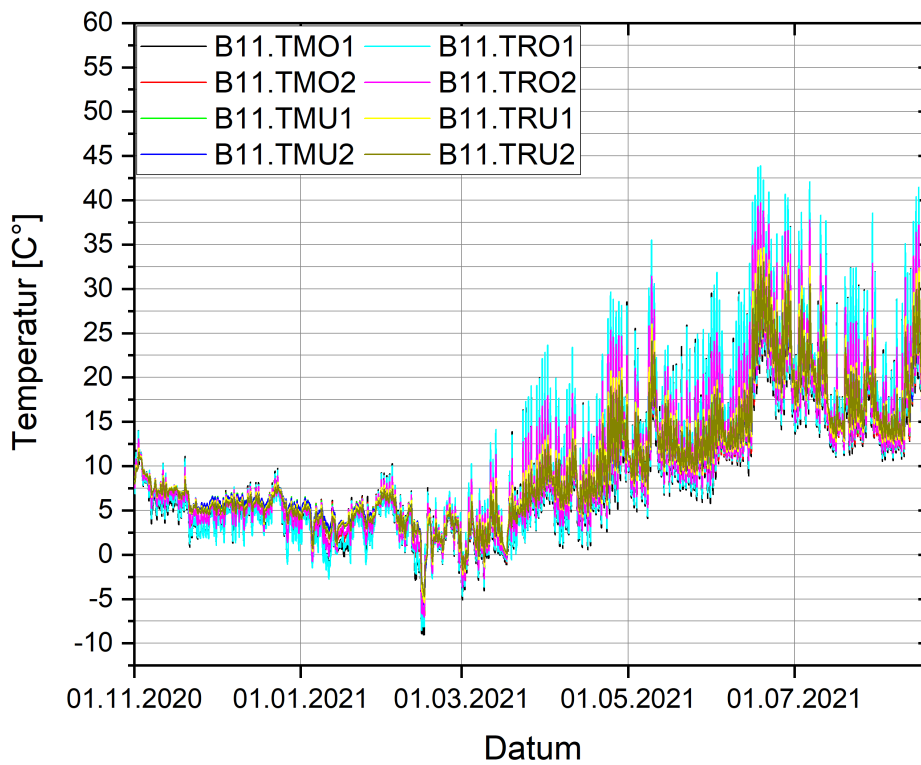


Abb. 2-49 Testfeld B1.1, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum

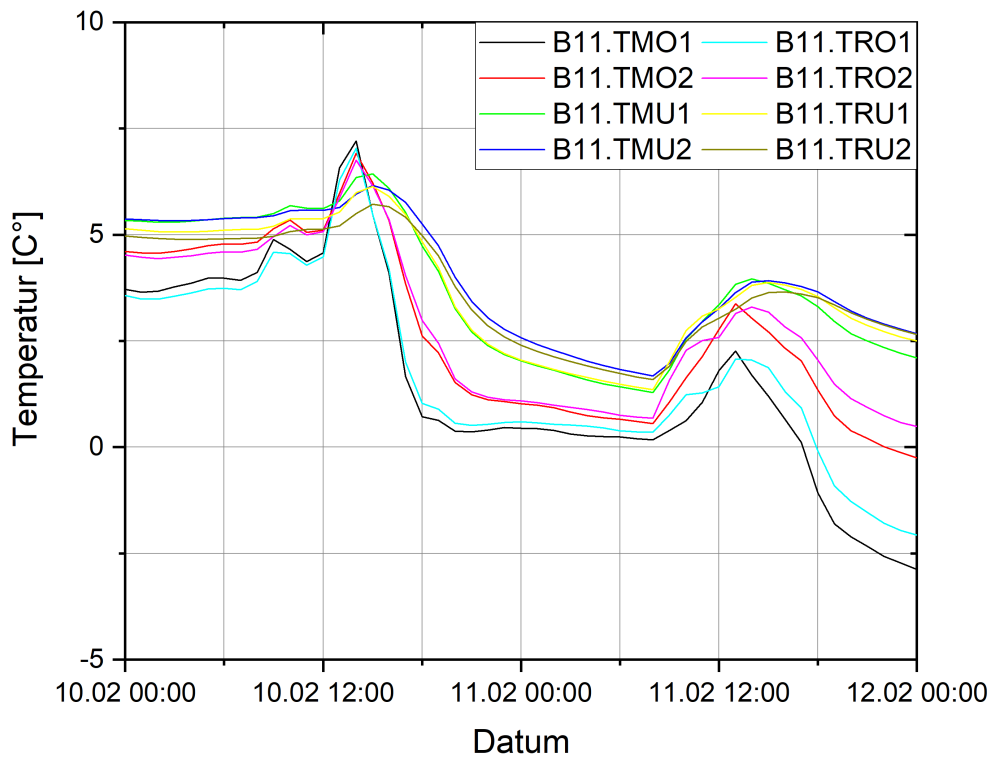


Abb. 2-50 Testfeld B1.1, Temperaturmessung während Schneezszenario

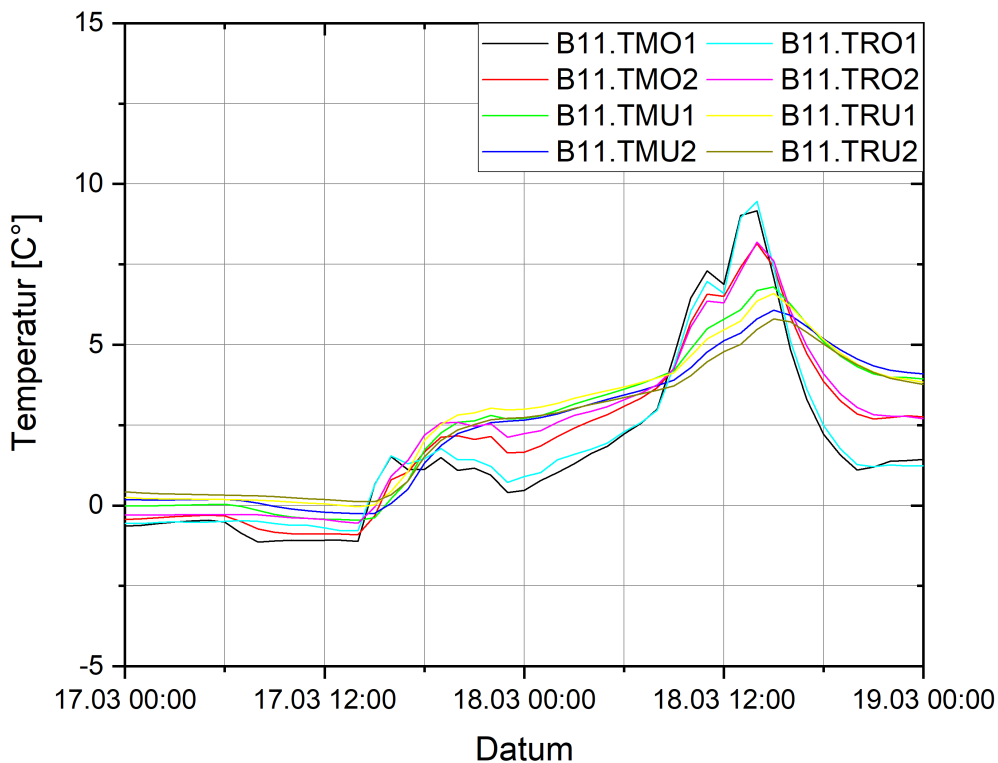


Abb. 2-51 Testfeld B1.1, Temperaturmessung während Trägheitsszenario

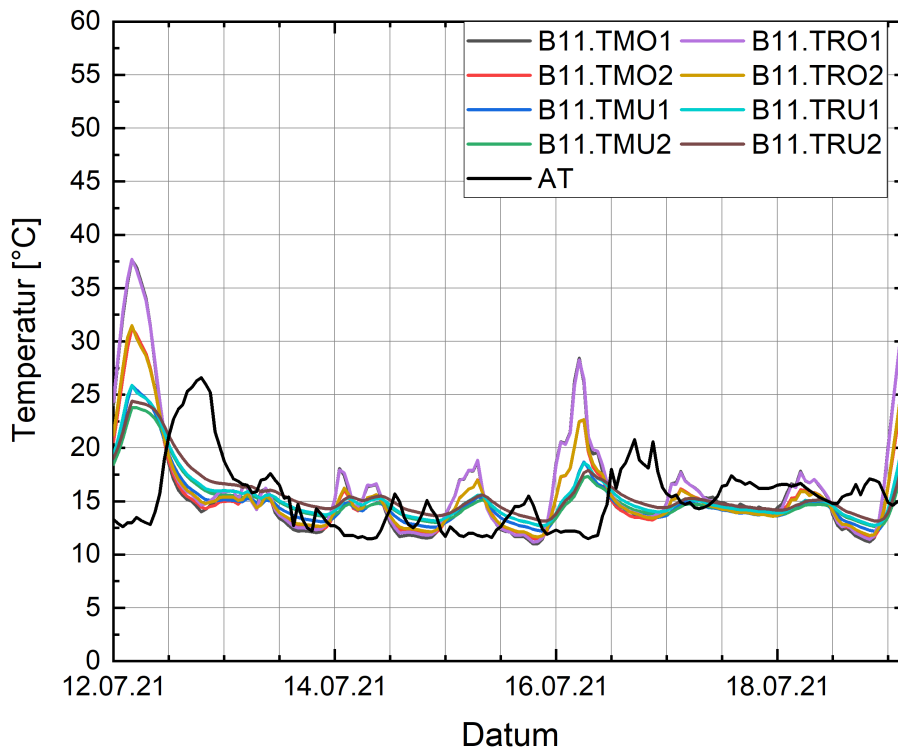


Abb. 2-52 Testfeld B1.1, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario

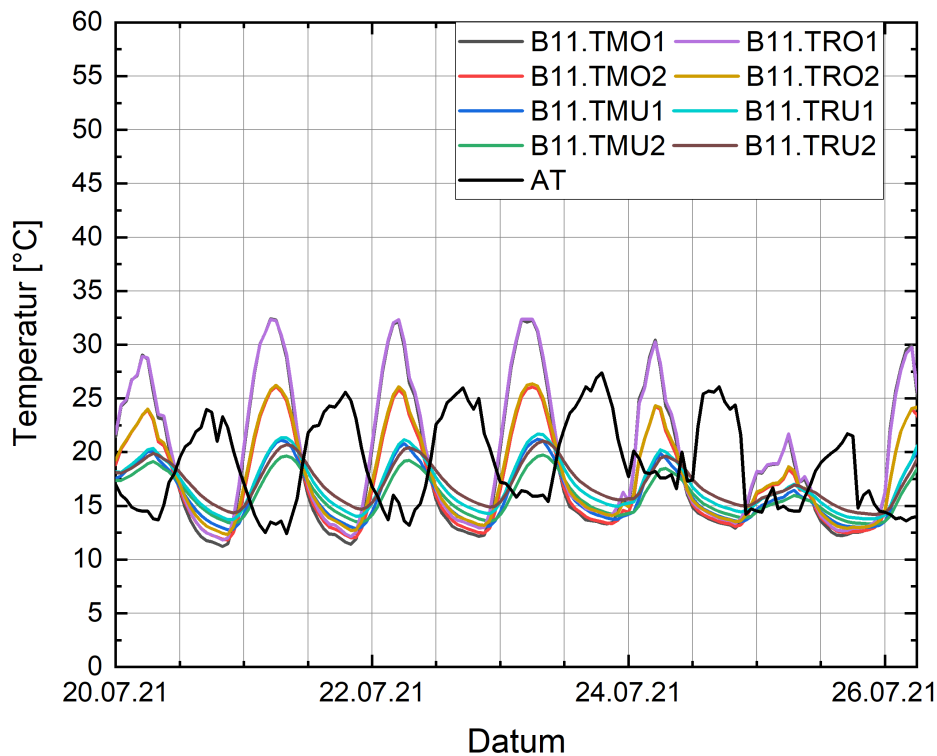


Abb. 2-53 Testfeld B1.1, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb

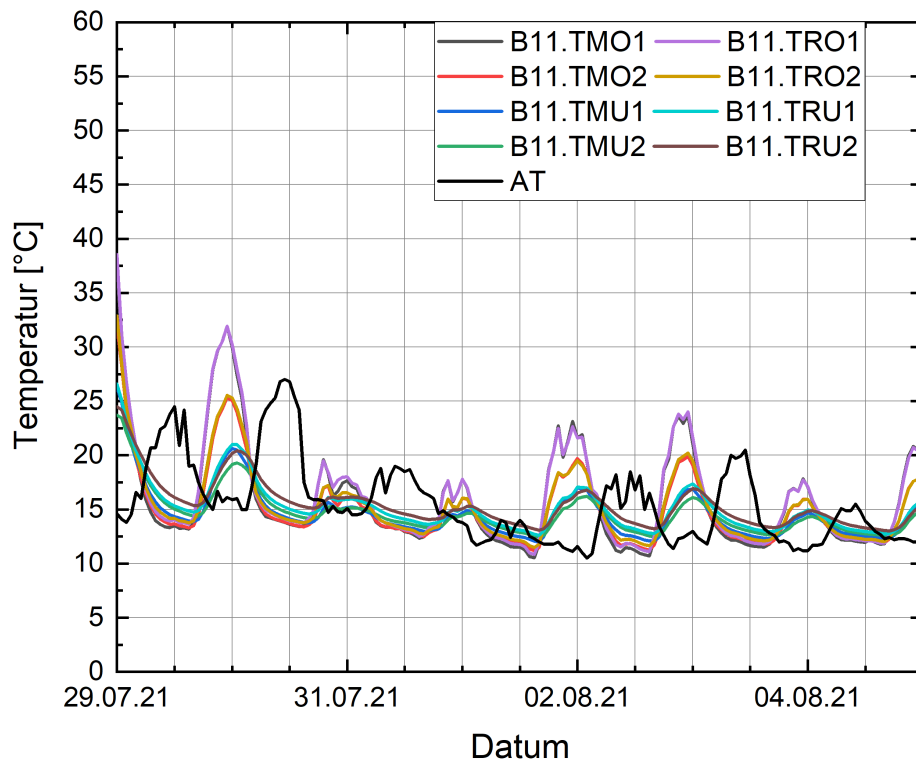


Abb. 2-54 Testfeld B1.1, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb

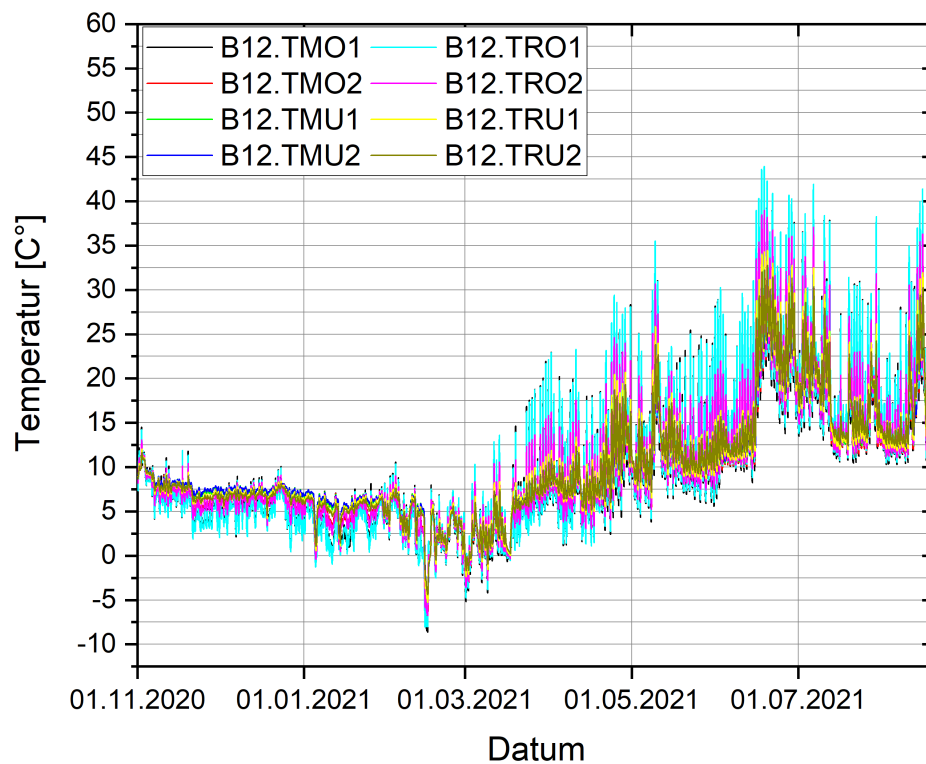


Abb. 2-55 Testfeld B1.2, Temperaturmessung über den bisherigen Zeitraum

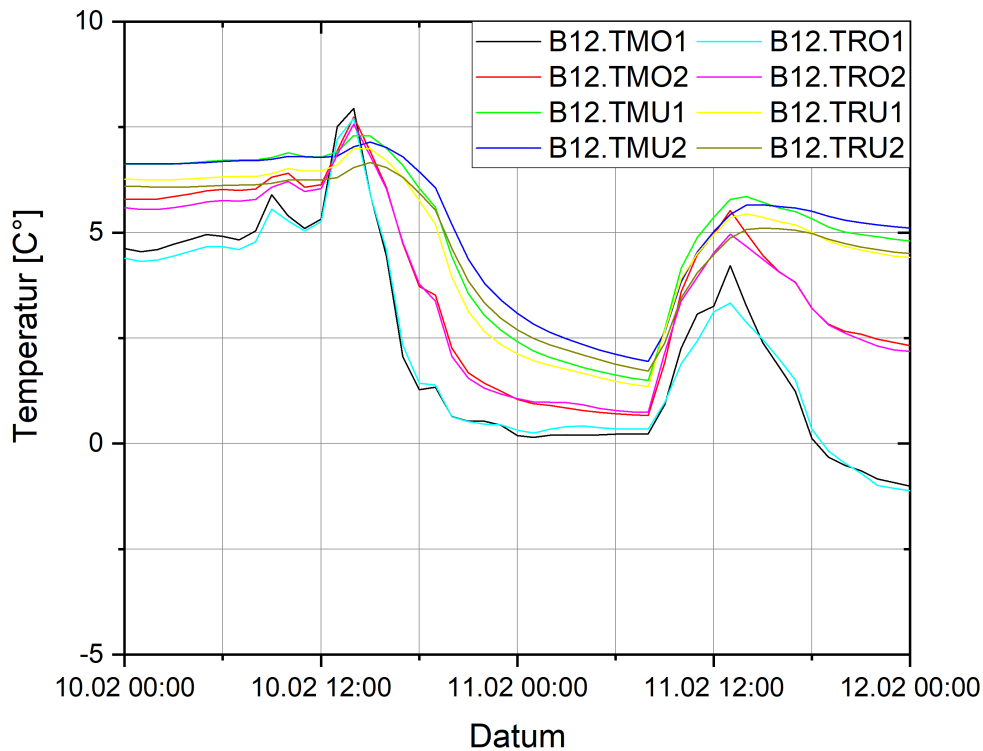


Abb. 2-56 Testfeld B1.2, Temperaturmessung während Schneezszenario

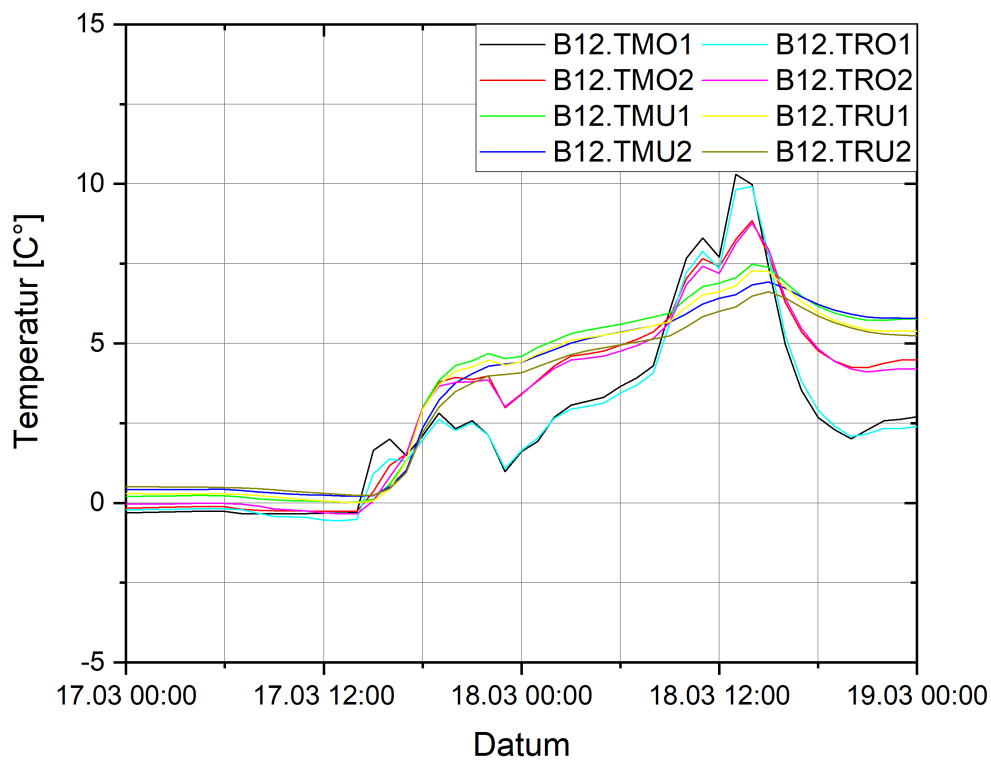


Abb. 2-57 Testfeld B1.2, Temperaturmessung während Trägheitsszenario

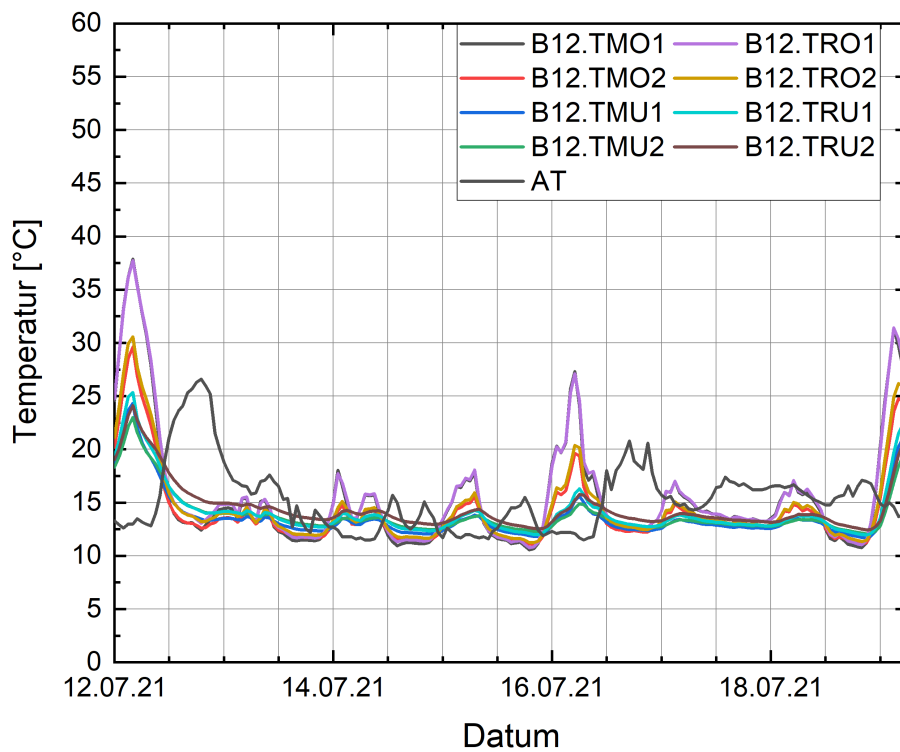


Abb. 2-58 Testfeld B1.2, Temperaturmessung während sommerlichen Trägheitsszenario

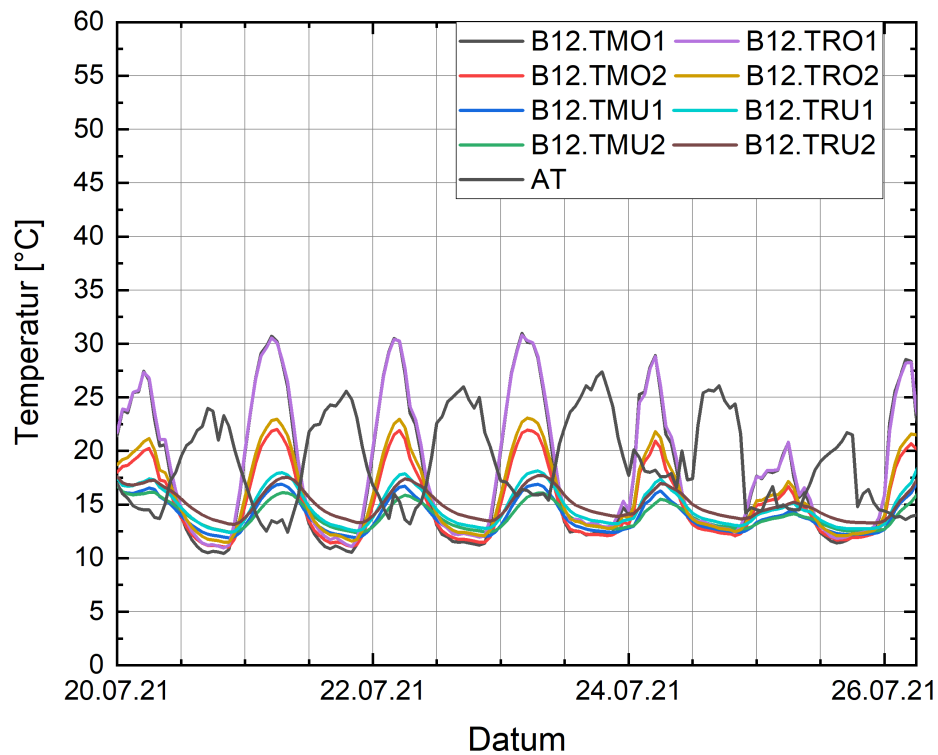


Abb. 2-59 Testfeld B1.2, Temperaturmessung während ersten sommerlichen Regelbetrieb



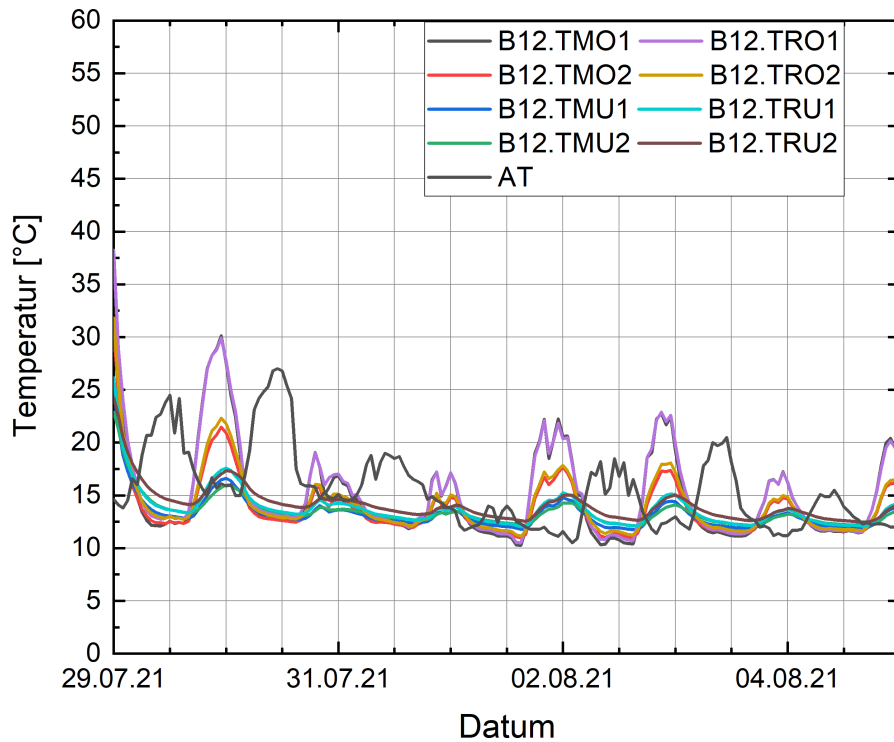


Abb. 2-60 Testfeld B1.2, Temperaturmessung während zweiten sommerlichen Regelbetrieb

#### 2.4 Messungen des Vor- und Rücklaufs in den Testflächen

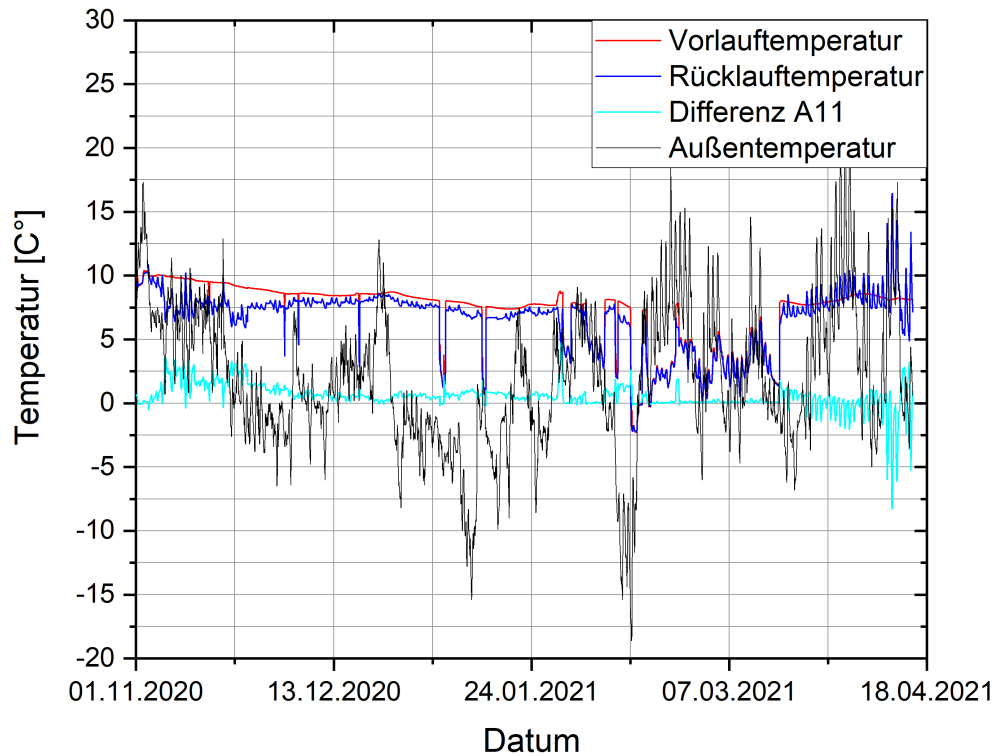


Abb. 2-61 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

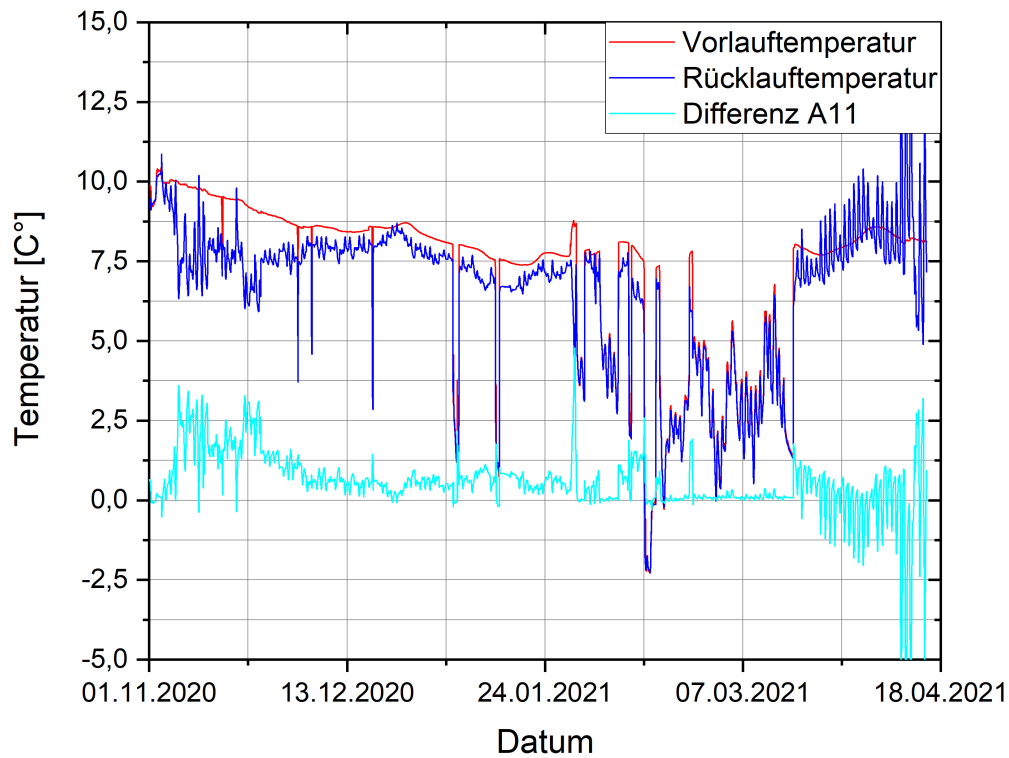


Abb. 2-62 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauf-temperaturen, Differenz

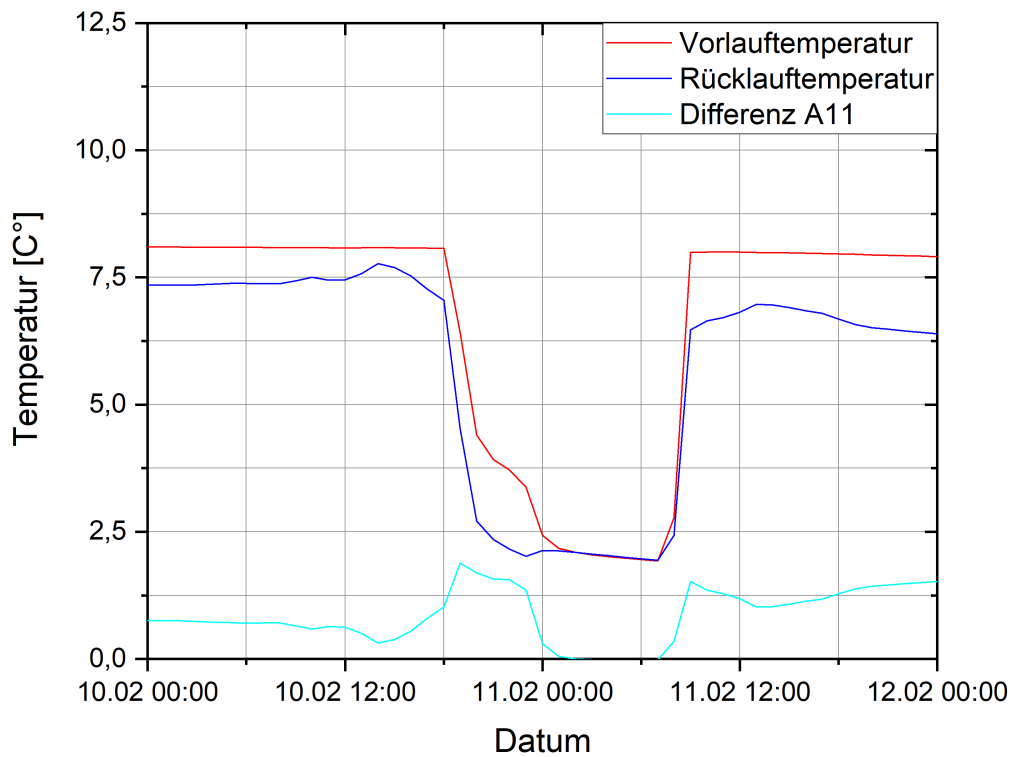


Abb. 2-63 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauf-temperaturen, Differenz während Schneezszenario

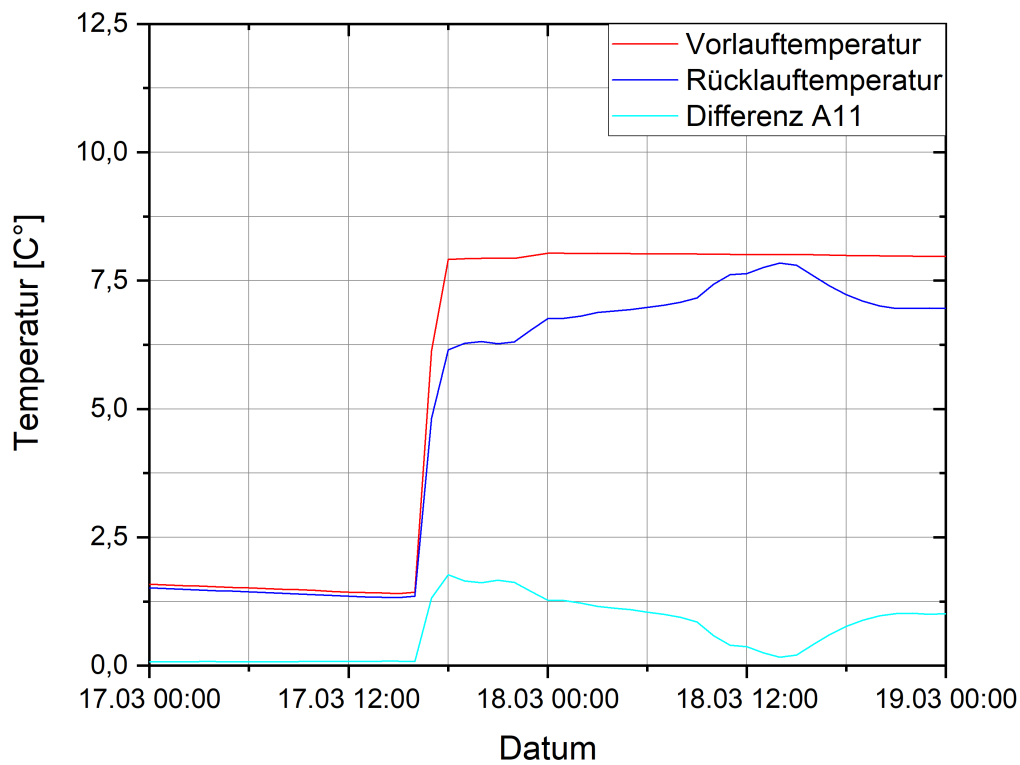


Abb. 2-64 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

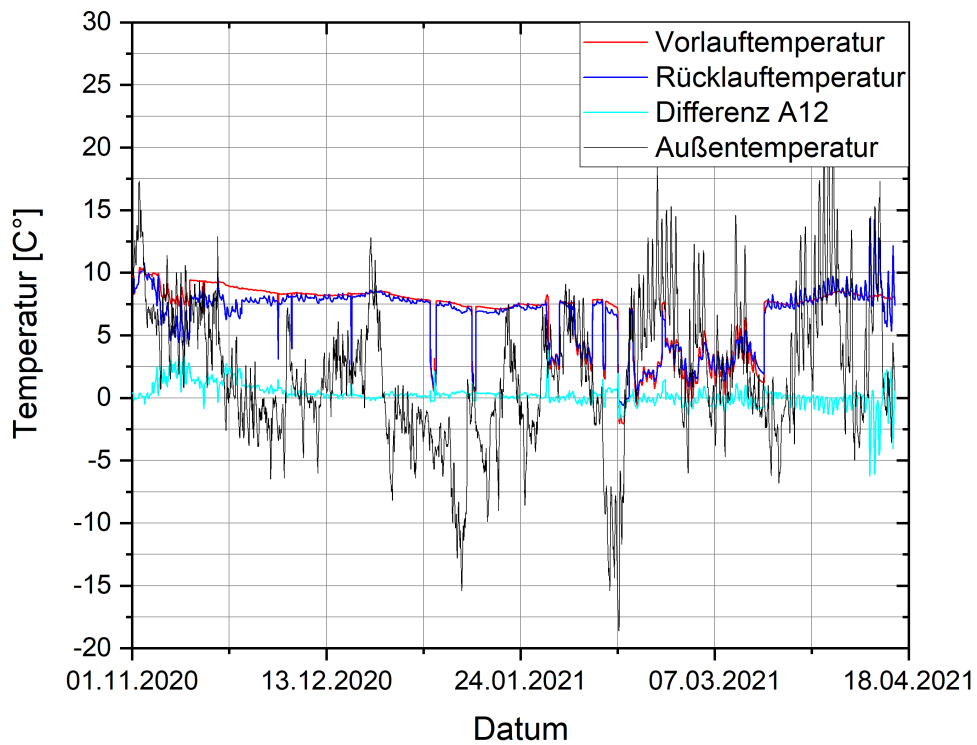


Abb. 2-65 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

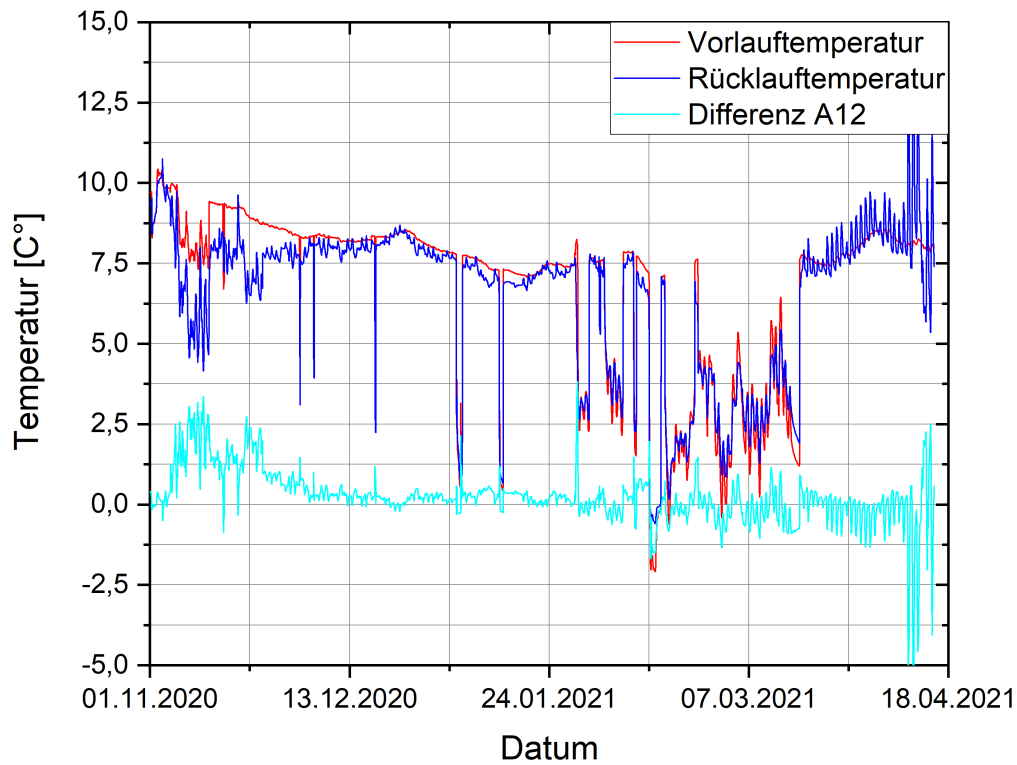


Abb. 2-66 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

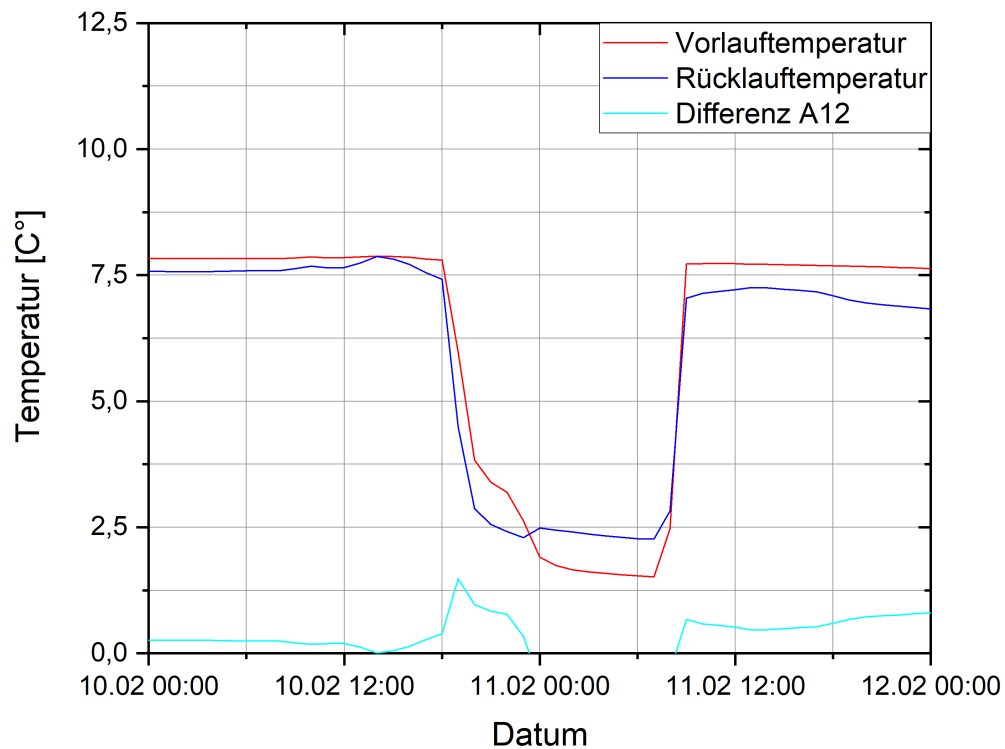


Abb. 2-67 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneezszenario

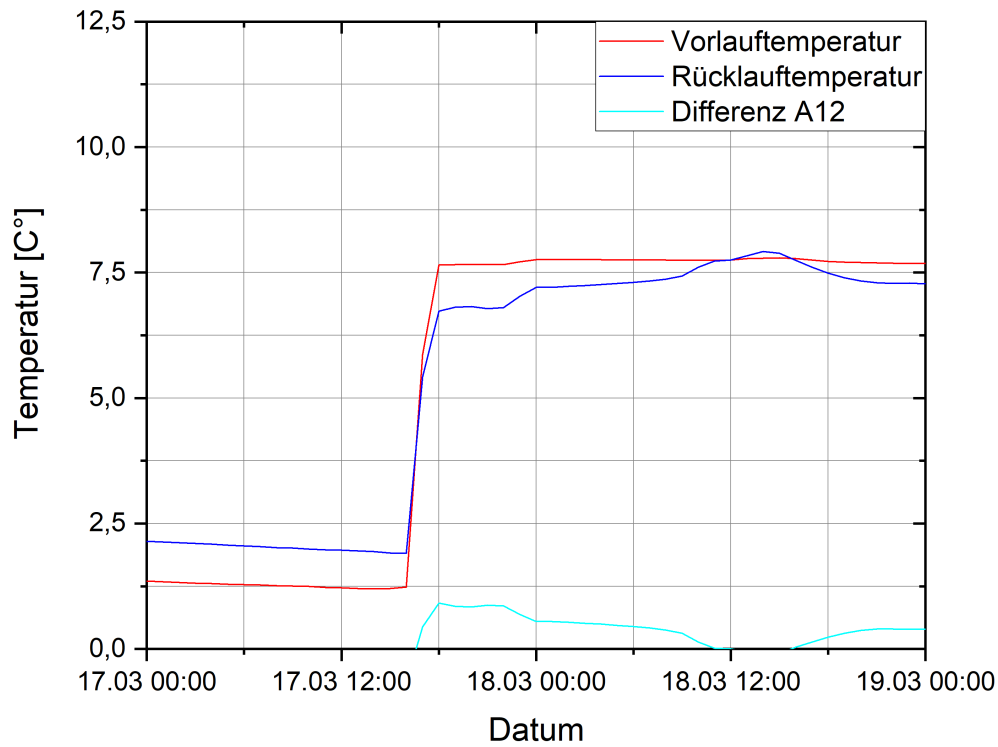


Abb. 2-68 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

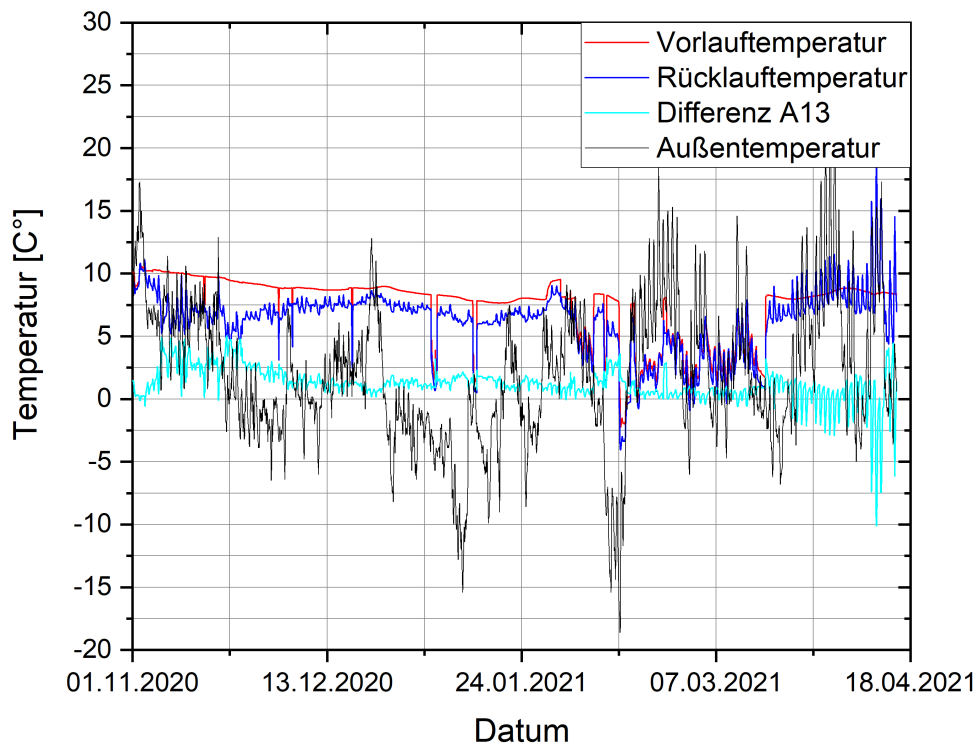


Abb. 2-69 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

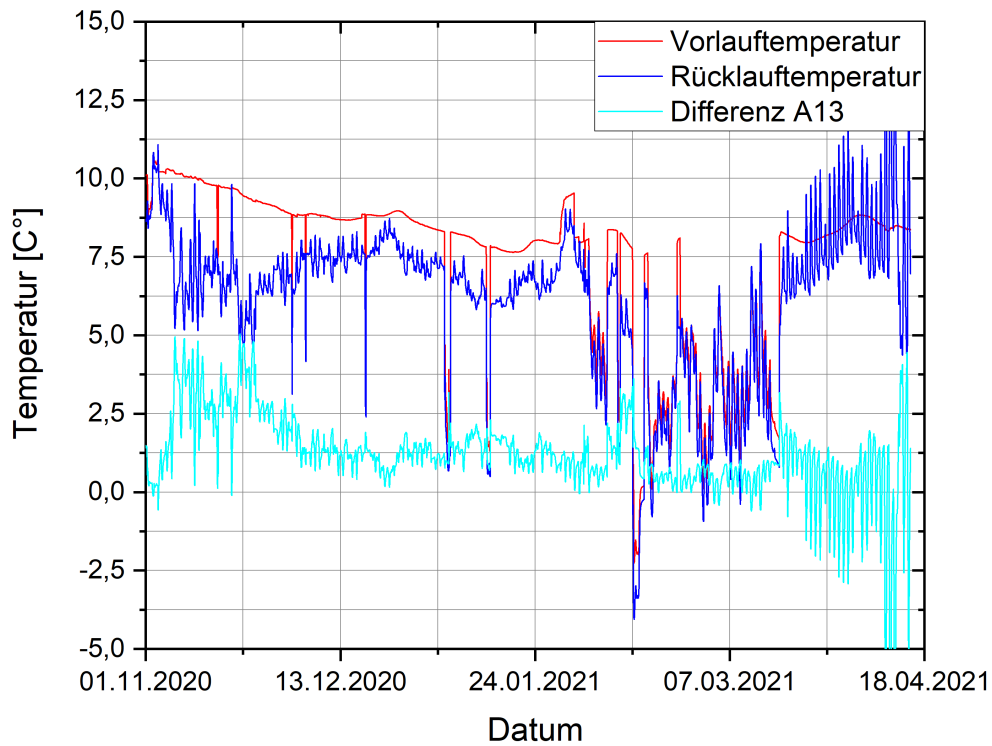


Abb. 2-70 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

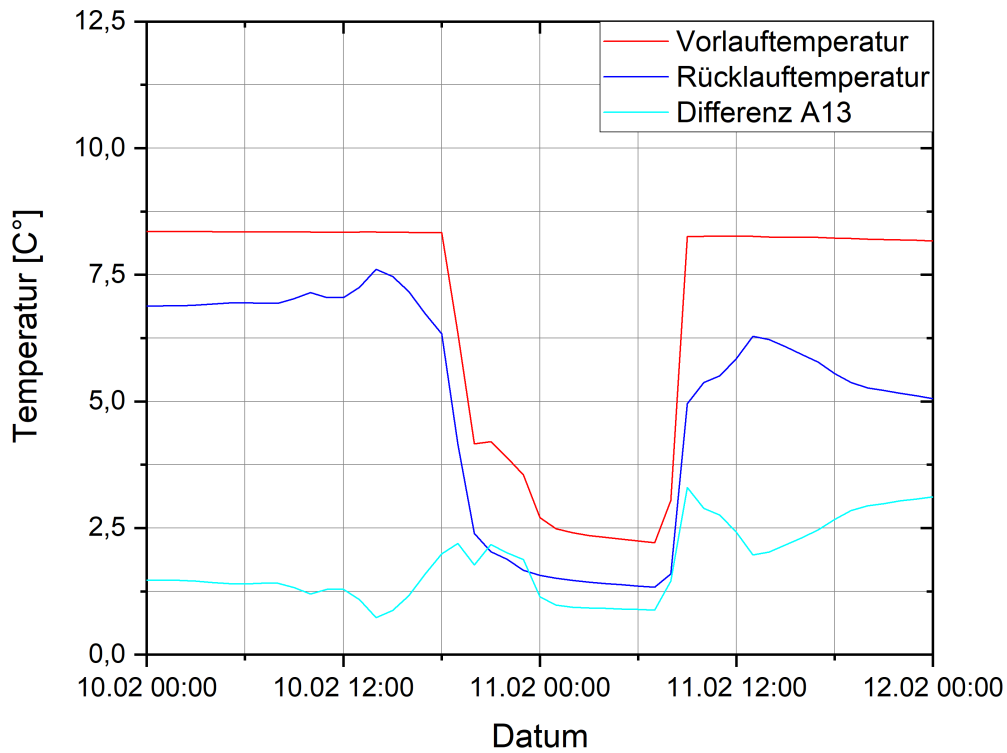


Abb. 2-71 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneesenario

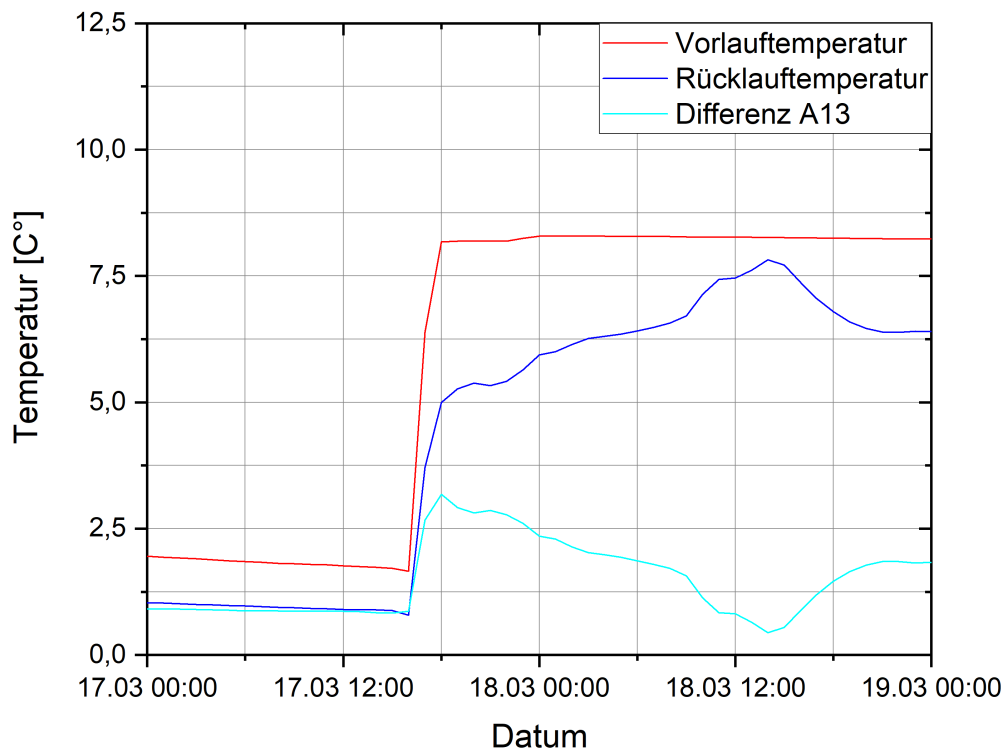


Abb. 2-72 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

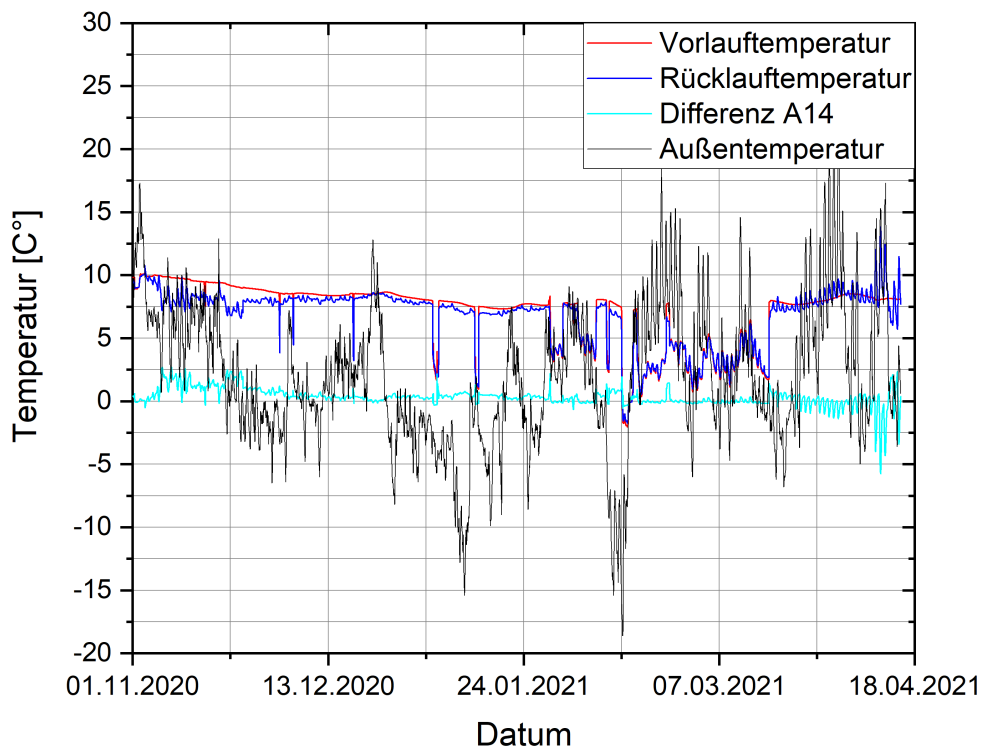


Abb. 2-73 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

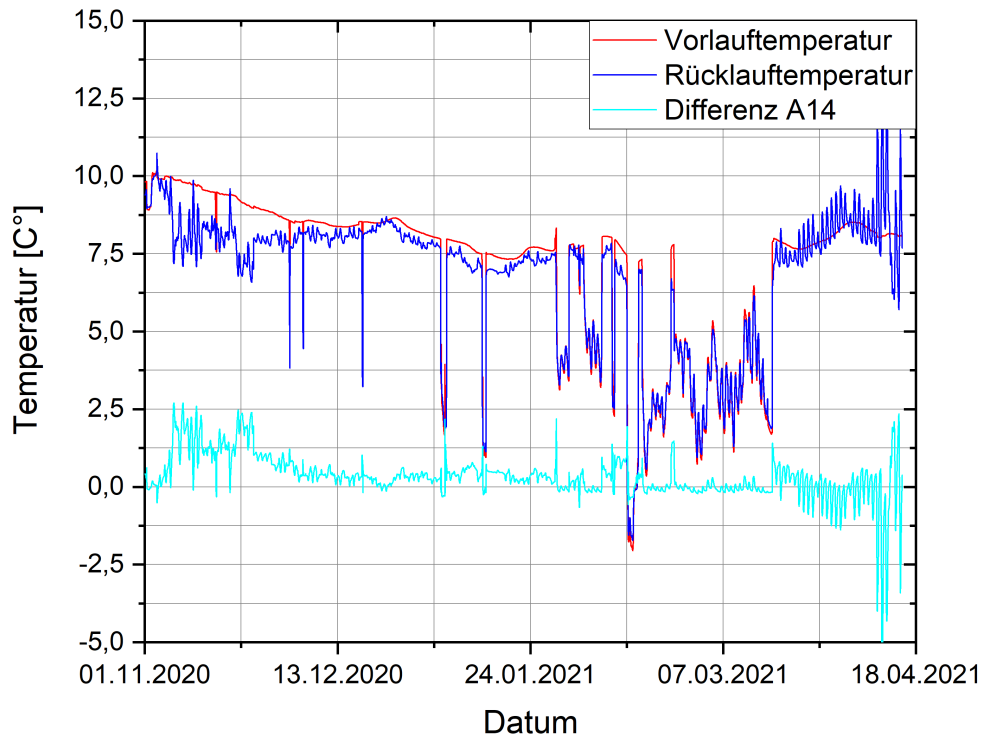


Abb. 2-74 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

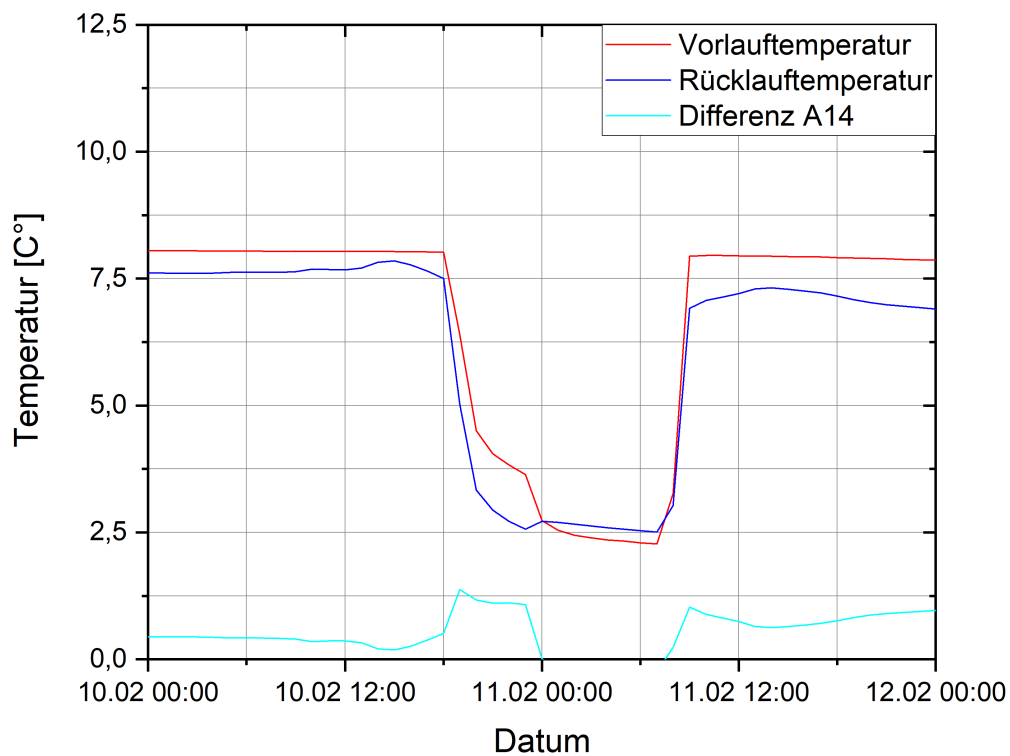


Abb. 2-75 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneesenario



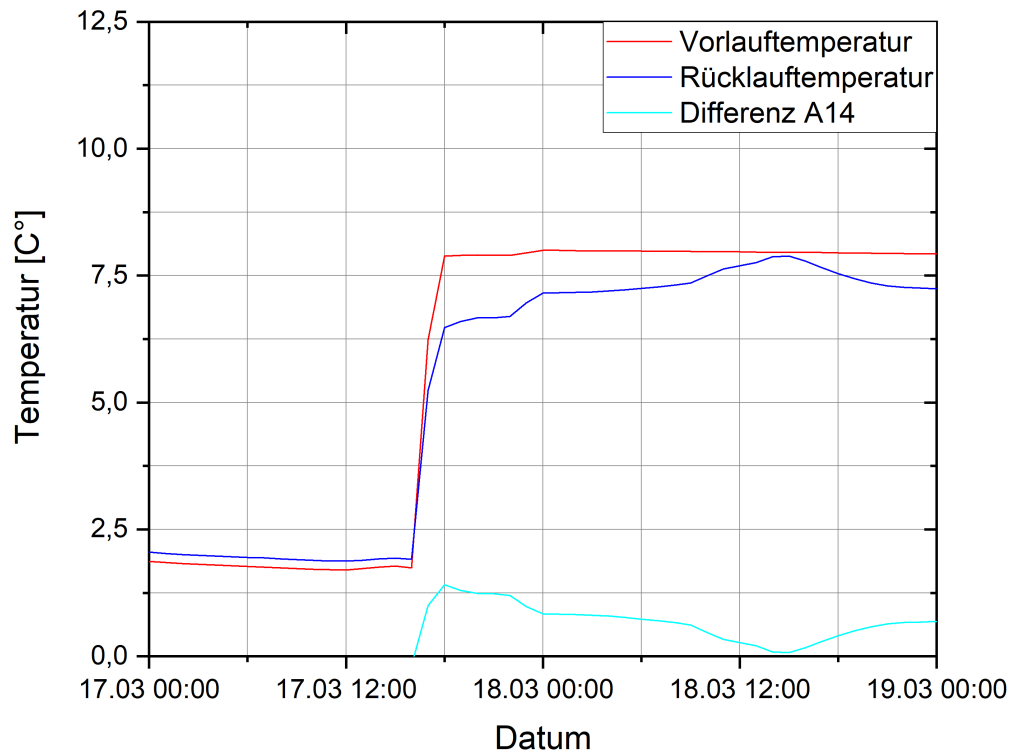


Abb. 2-76 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

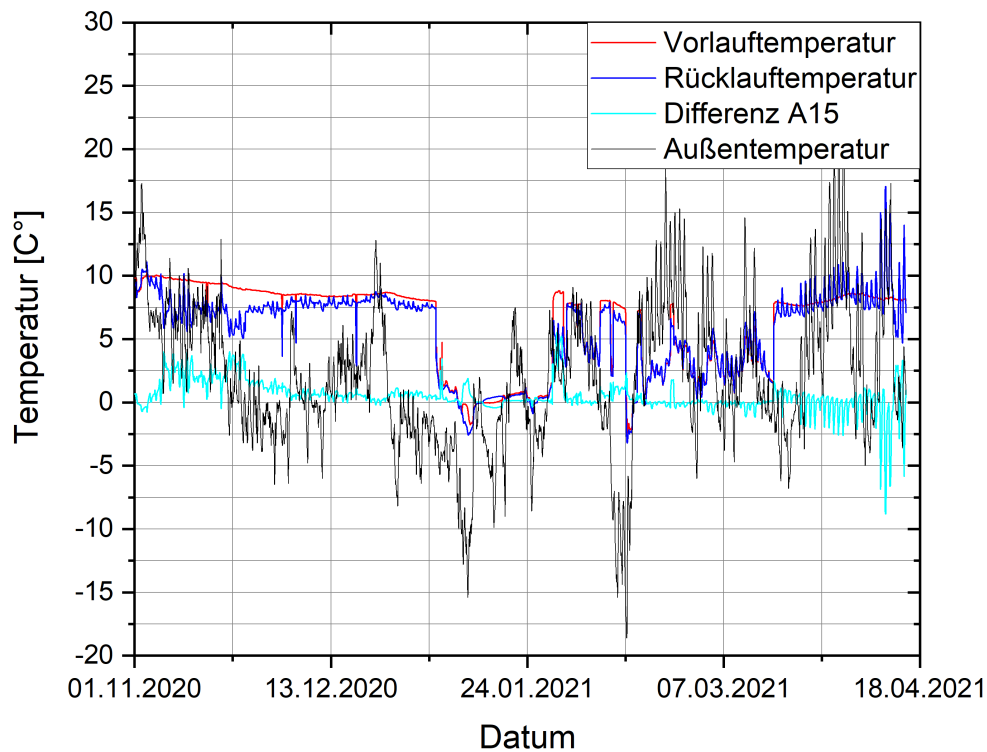


Abb. 2-77 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

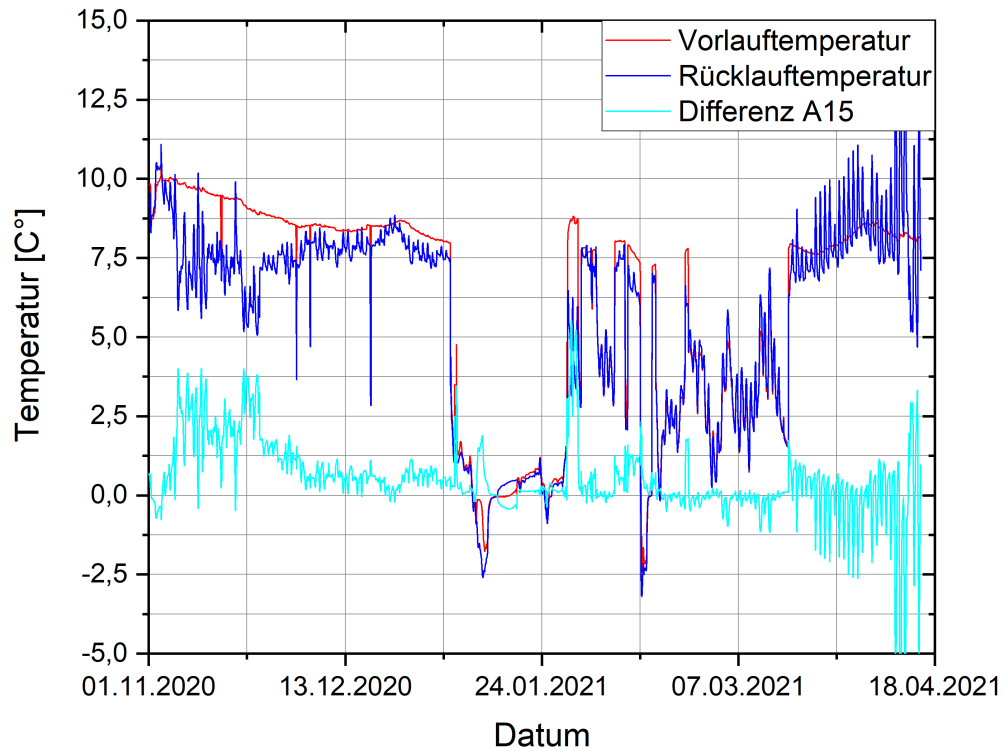


Abb. 2-78 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

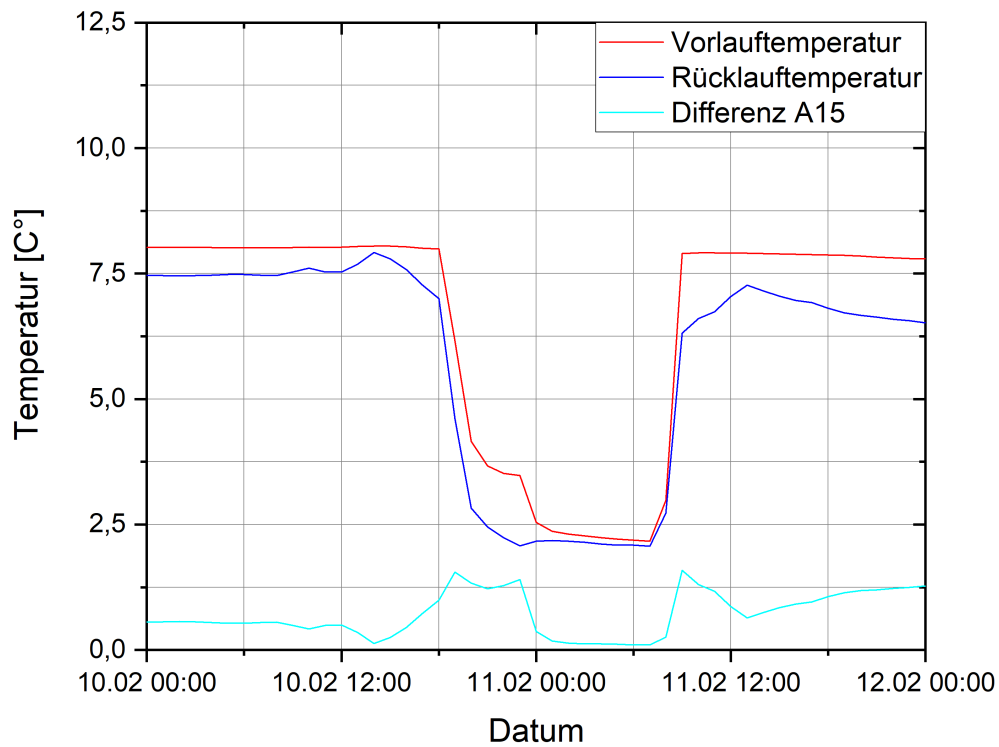


Abb. 2-79 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneezszenario

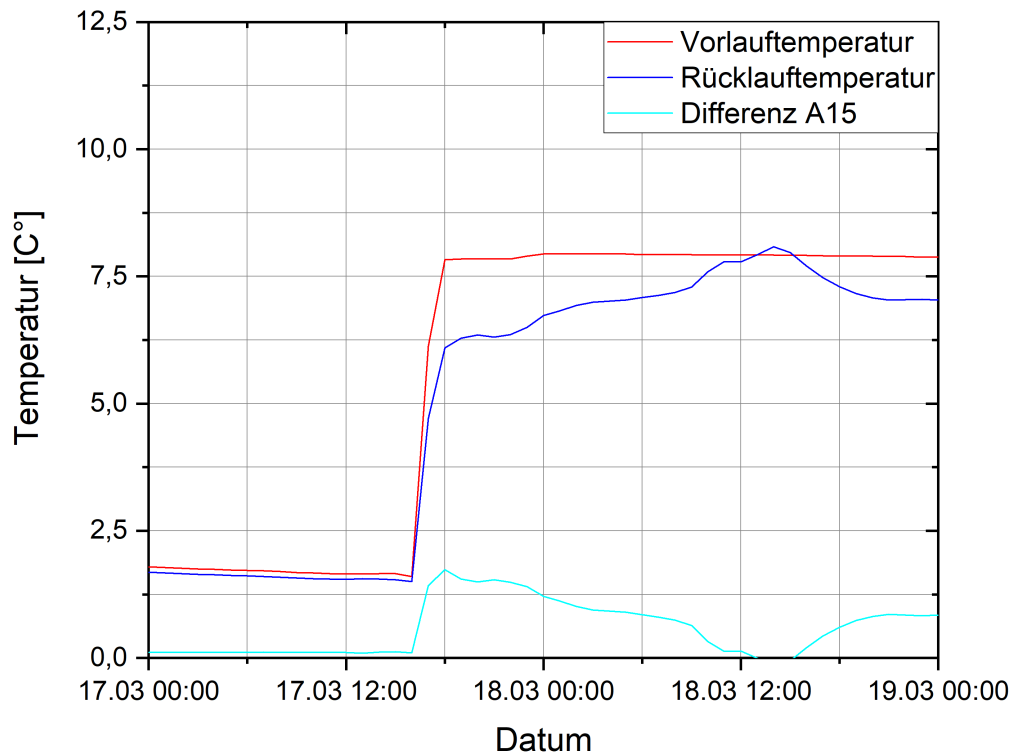


Abb. 2-80 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

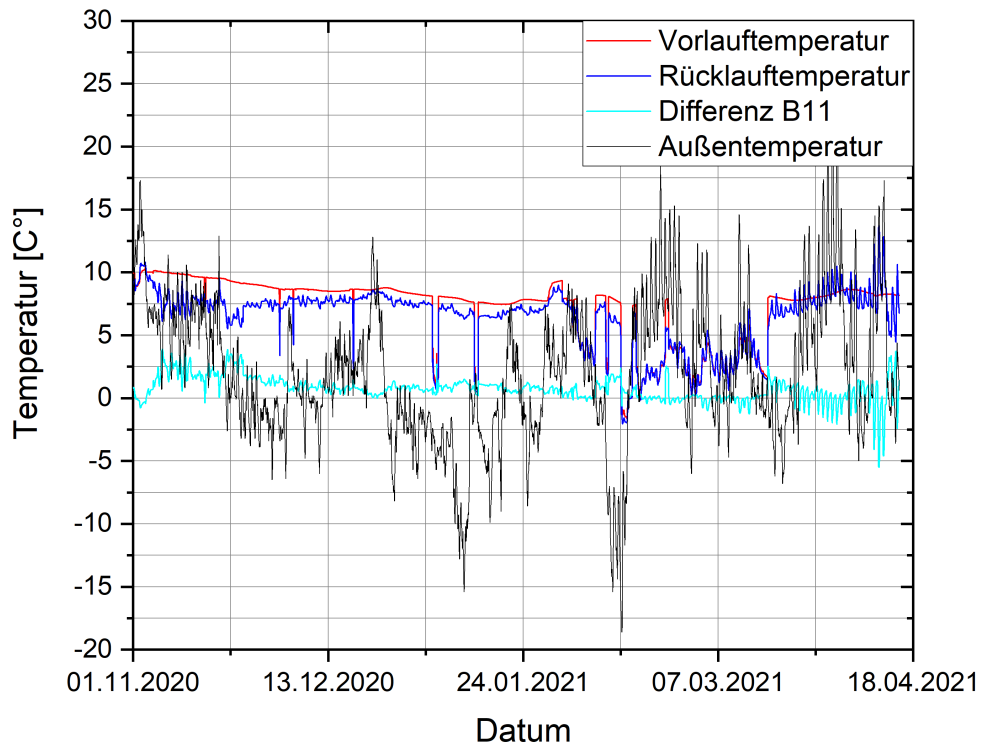


Abb. 2-81 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

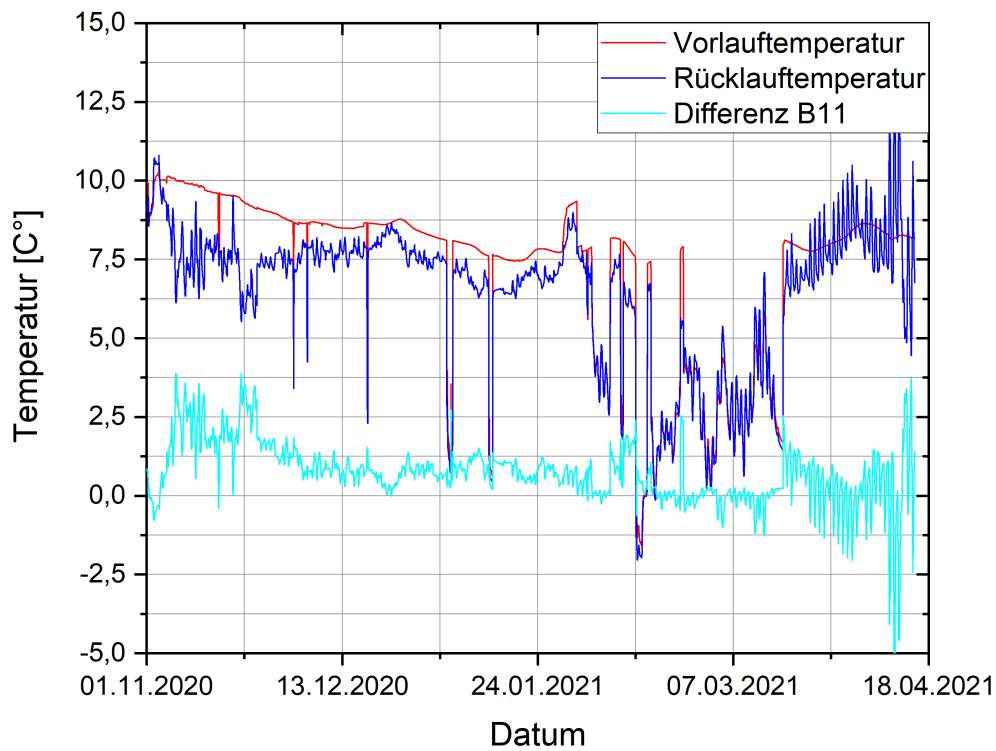


Abb. 2-82 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

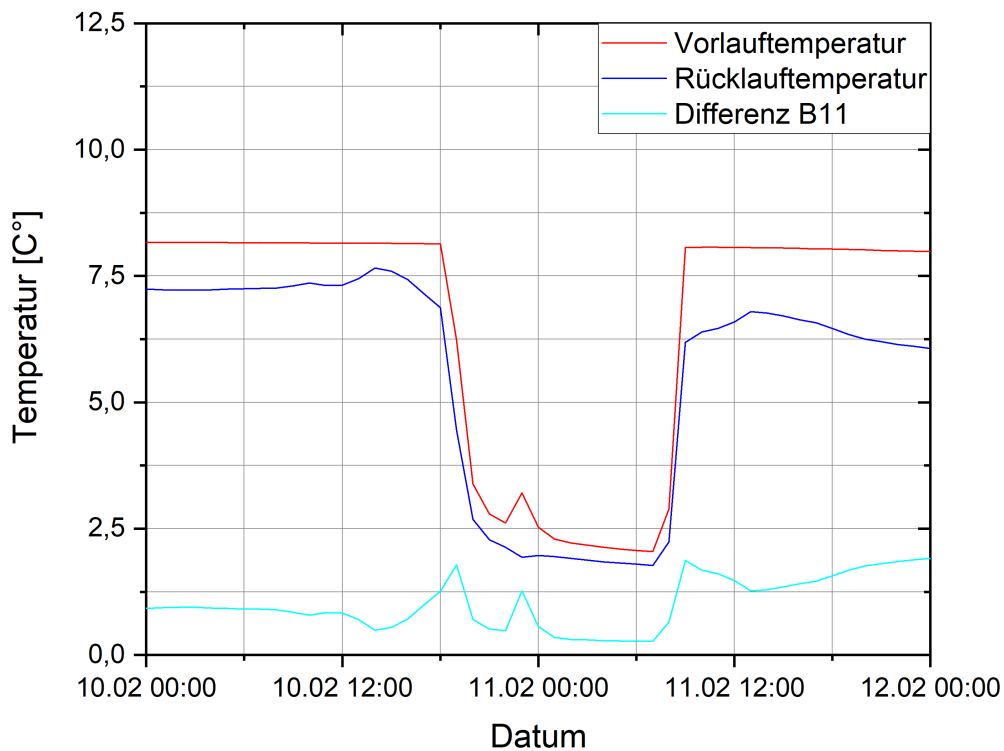


Abb. 2-83 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneesenario

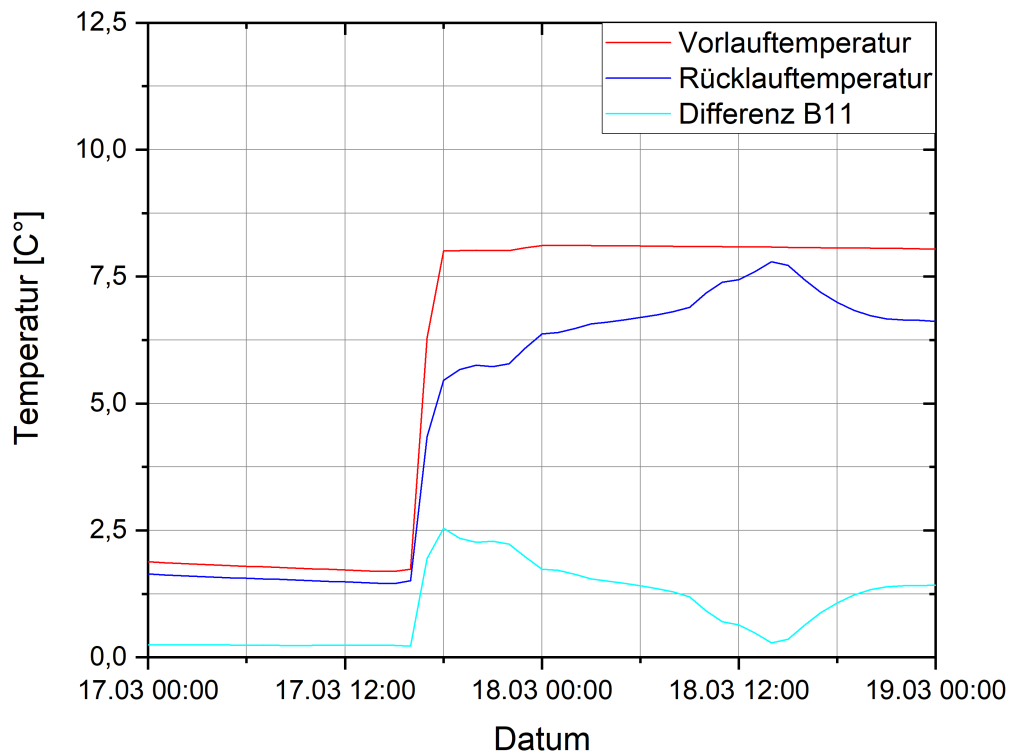


Abb. 2-84 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

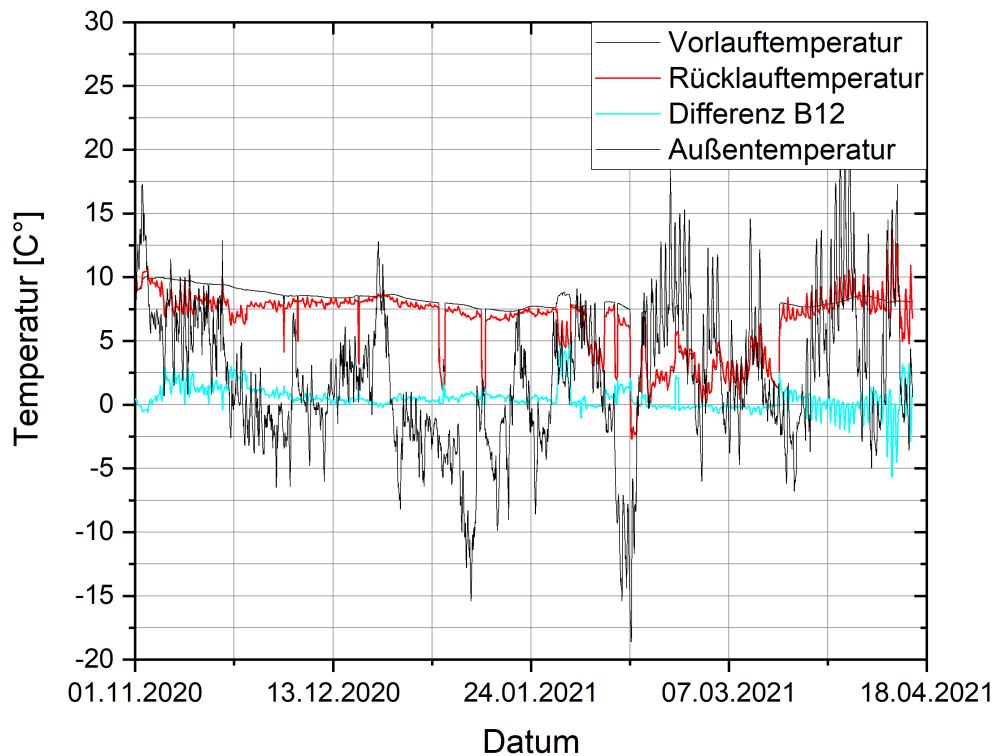


Abb. 2-85 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

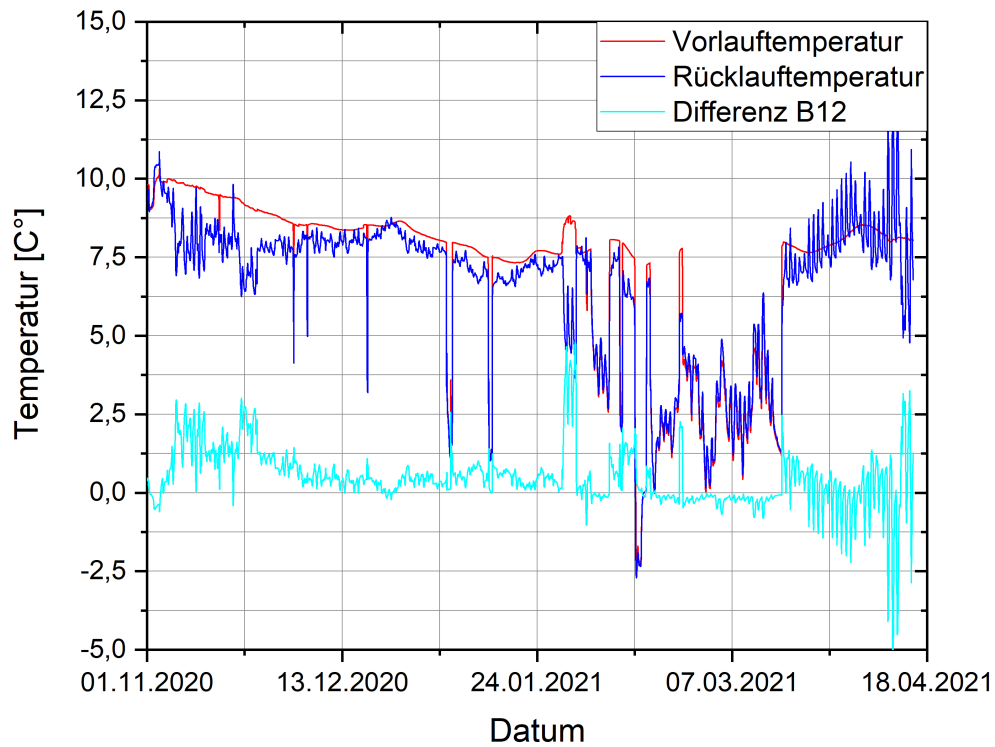


Abb. 2-86 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

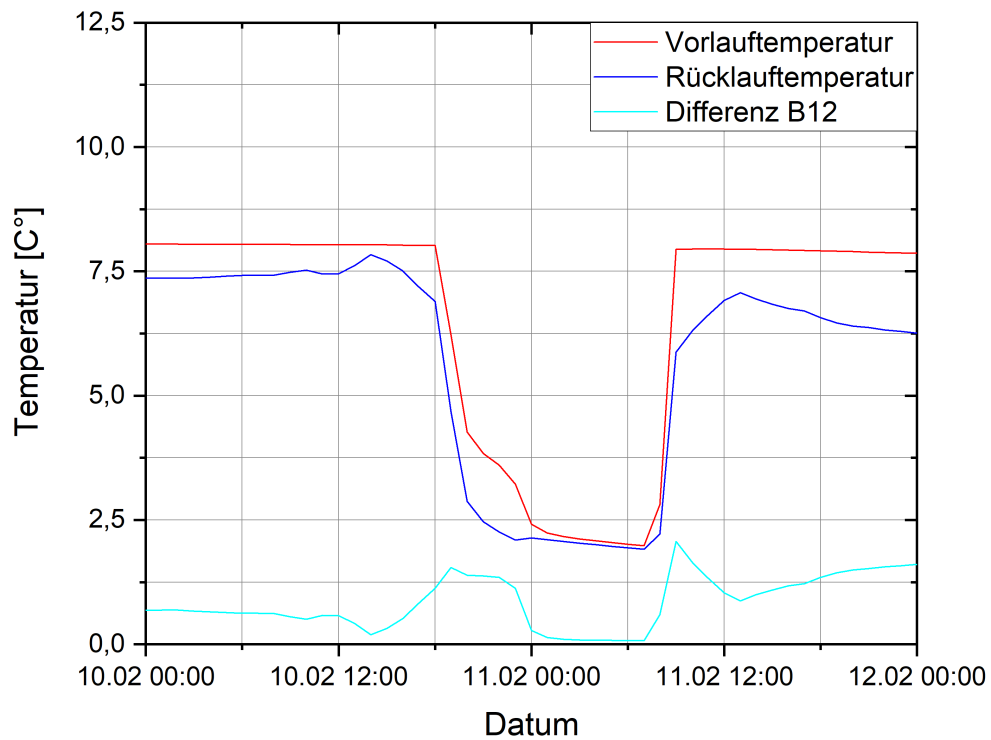


Abb. 2-87 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz während Schneesenario

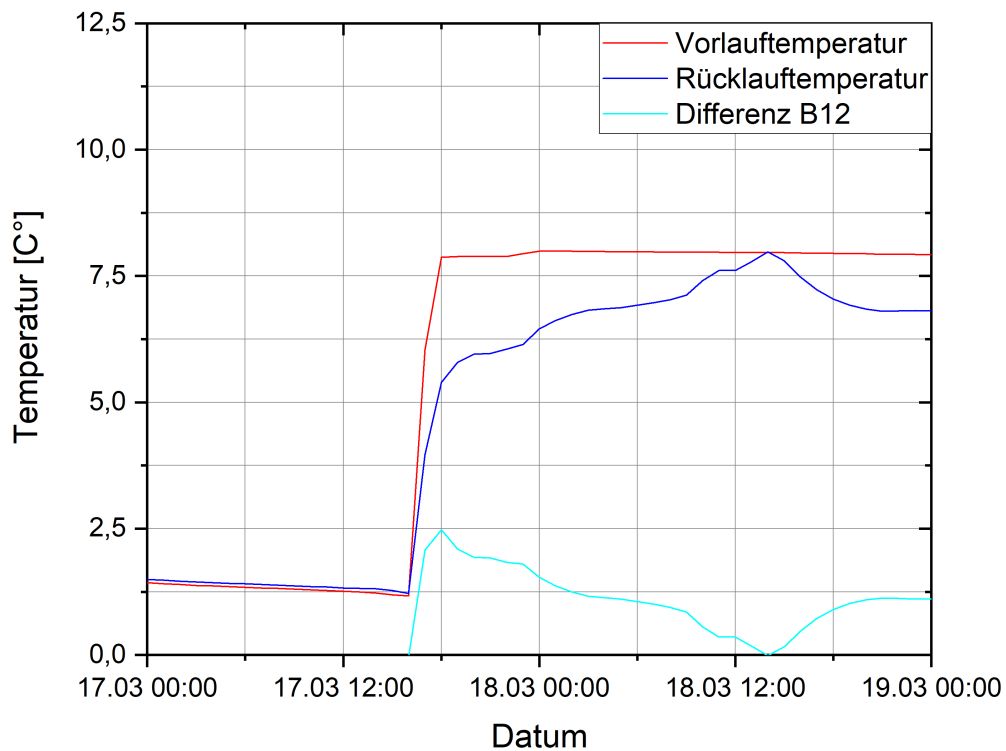


Abb. 2-88 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauf-temperaturen, Differenz während Trägheitsszenario

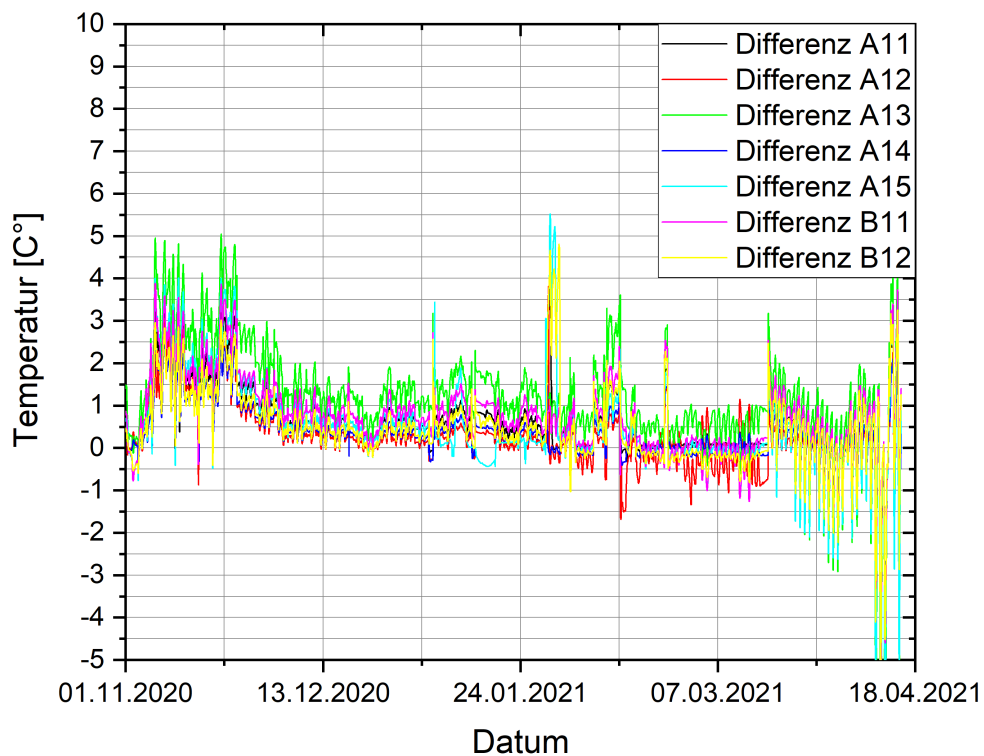


Abb. 2-89 Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder

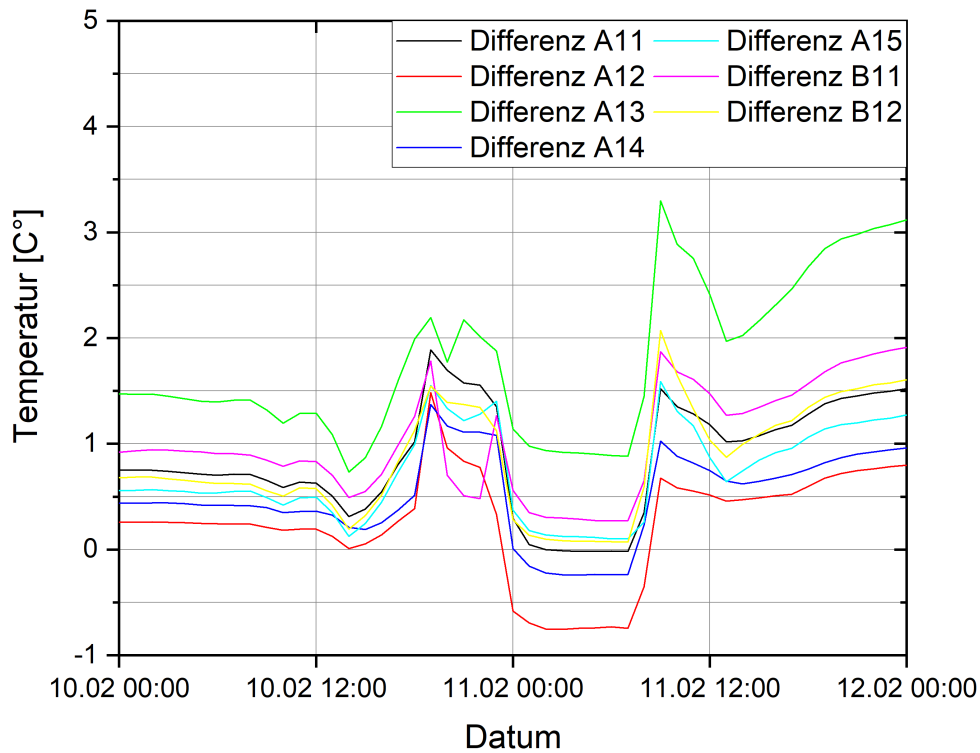


Abb. 2-90 Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder während des Schneezenarios

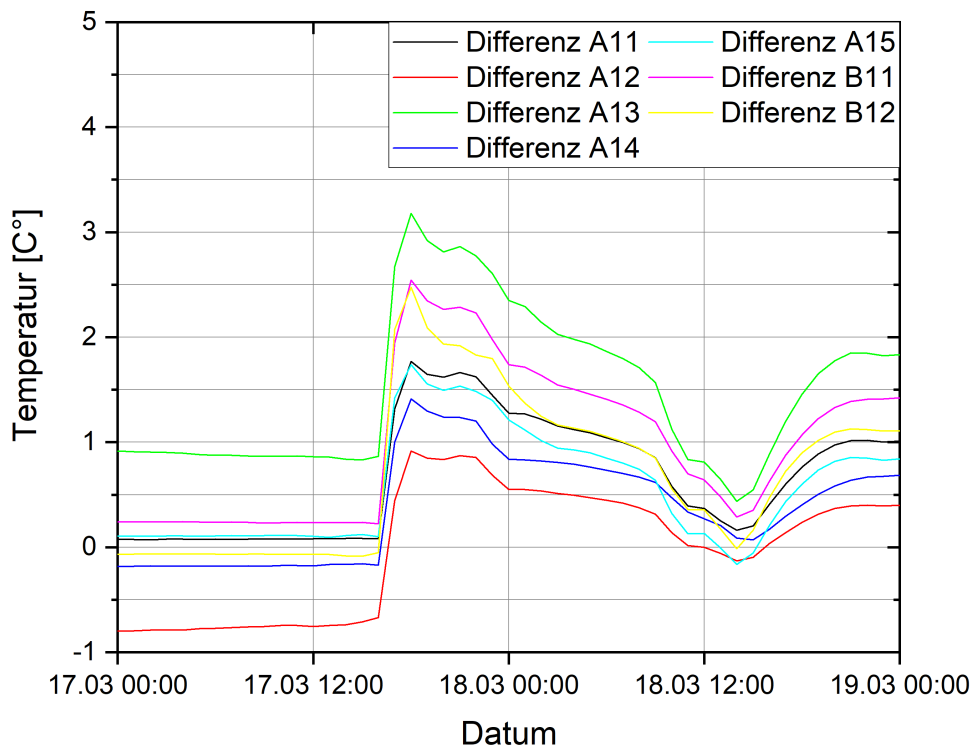
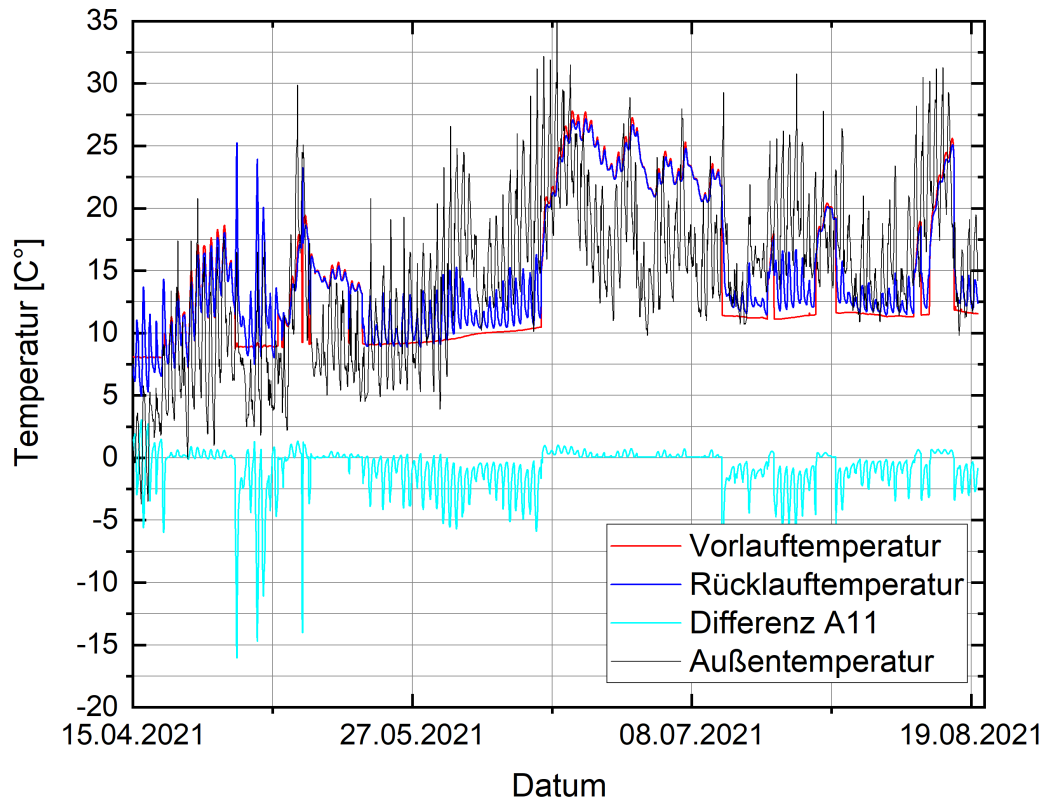


Abb. 2-91 Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder während des Trägheitsszenario





## 2.5 Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen in den Testflächen im Sommer



**Abb. 2-92** Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

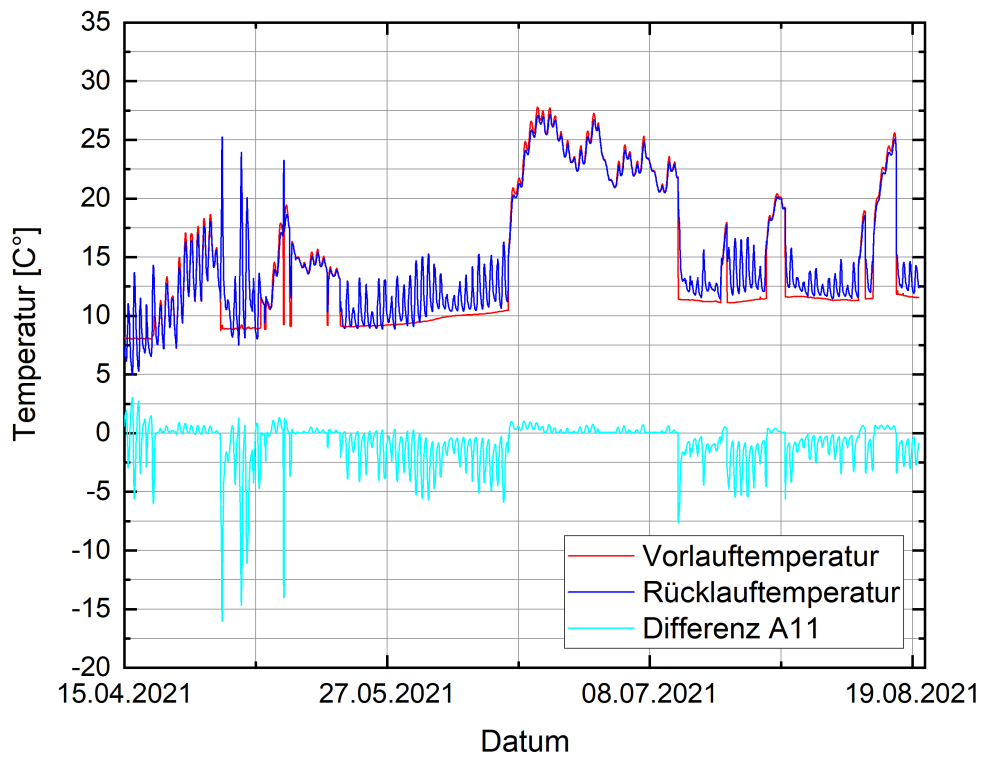


Abb. 2-93 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

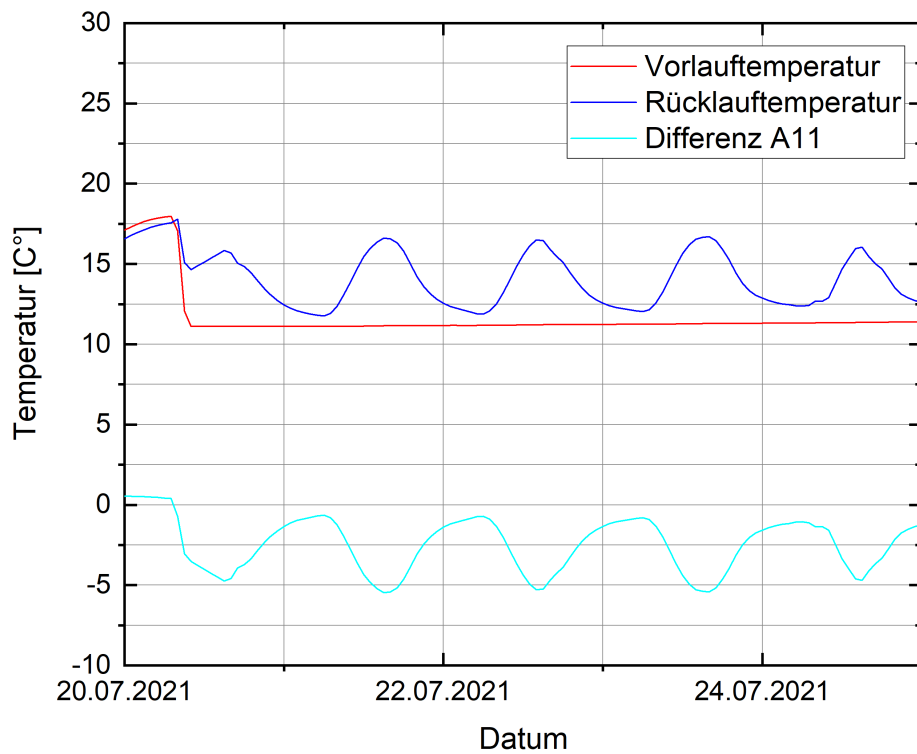


Abb. 2-94 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

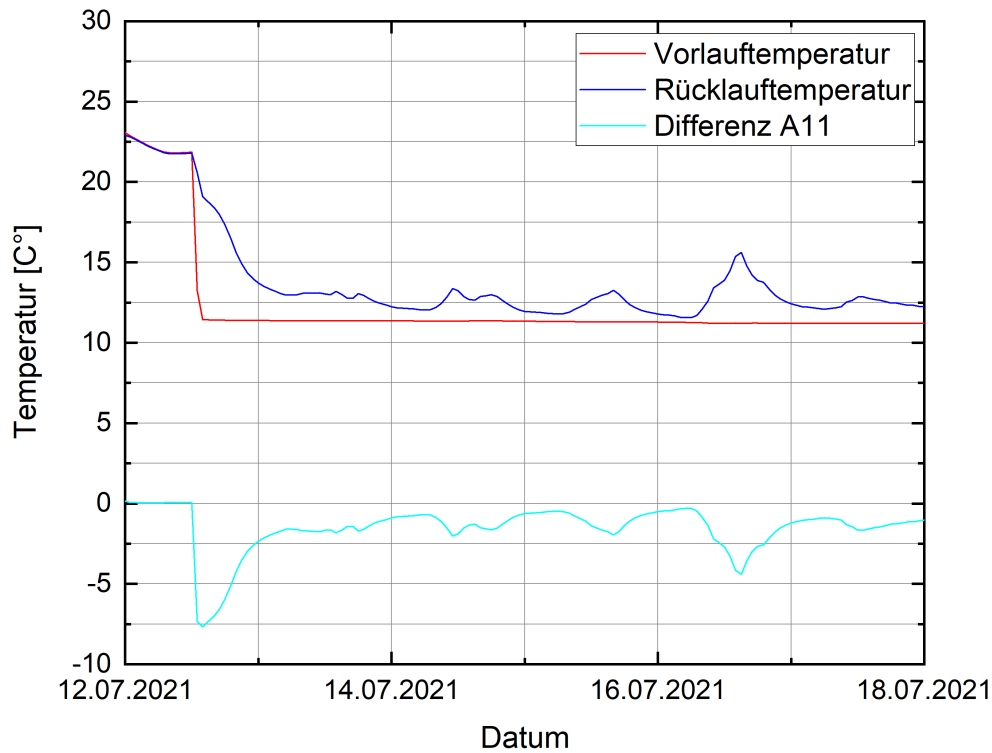


Abb. 2-95 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

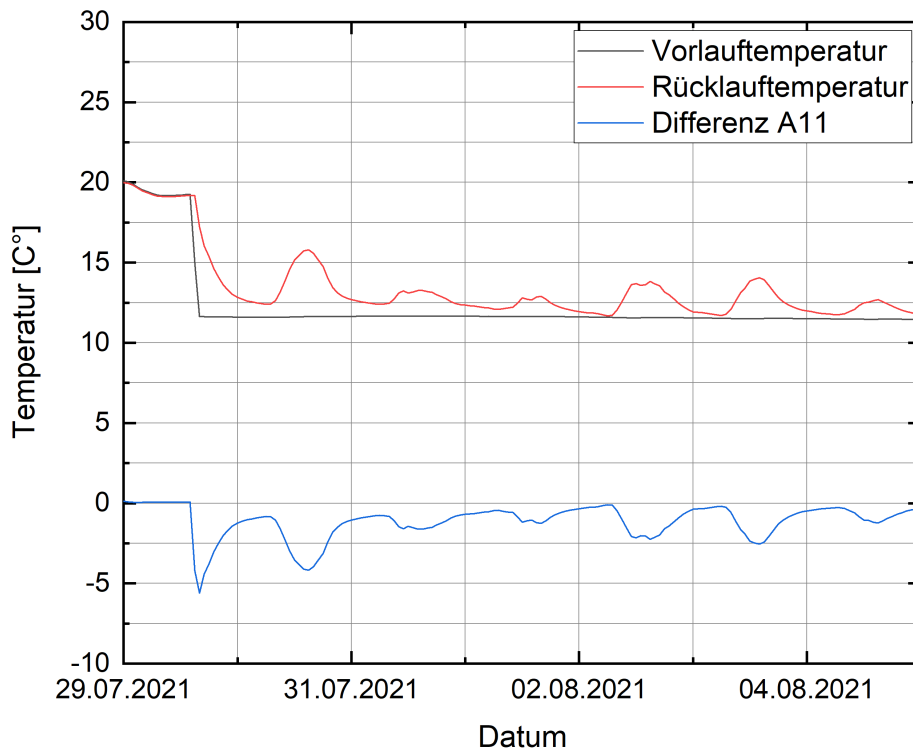


Abb. 2-96 Testfeld A1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

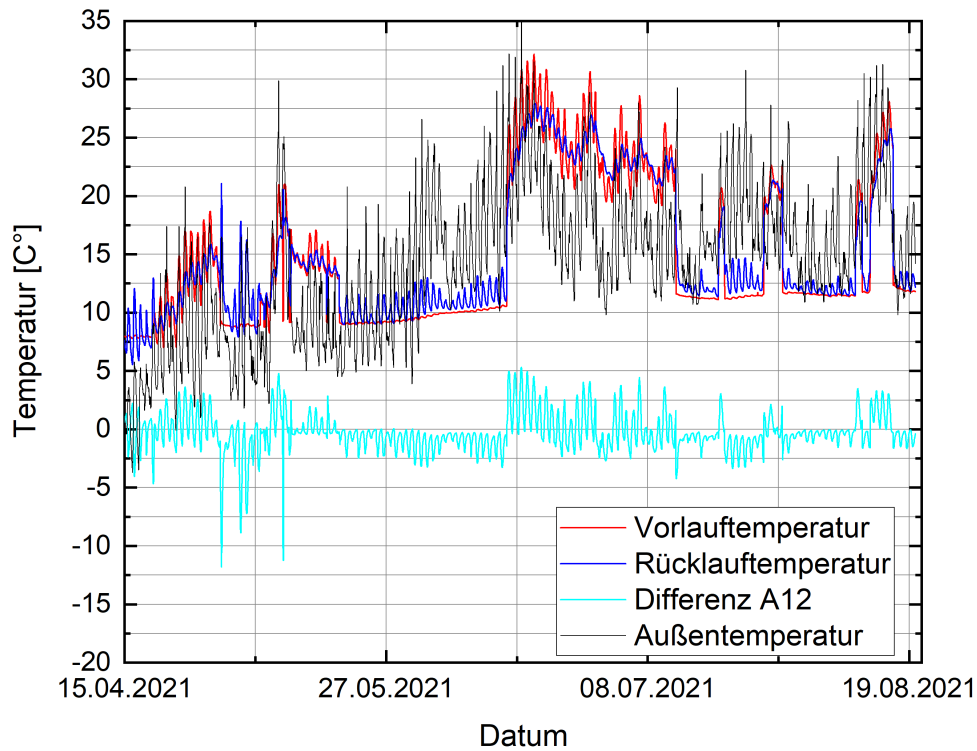


Abb. 2-97 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

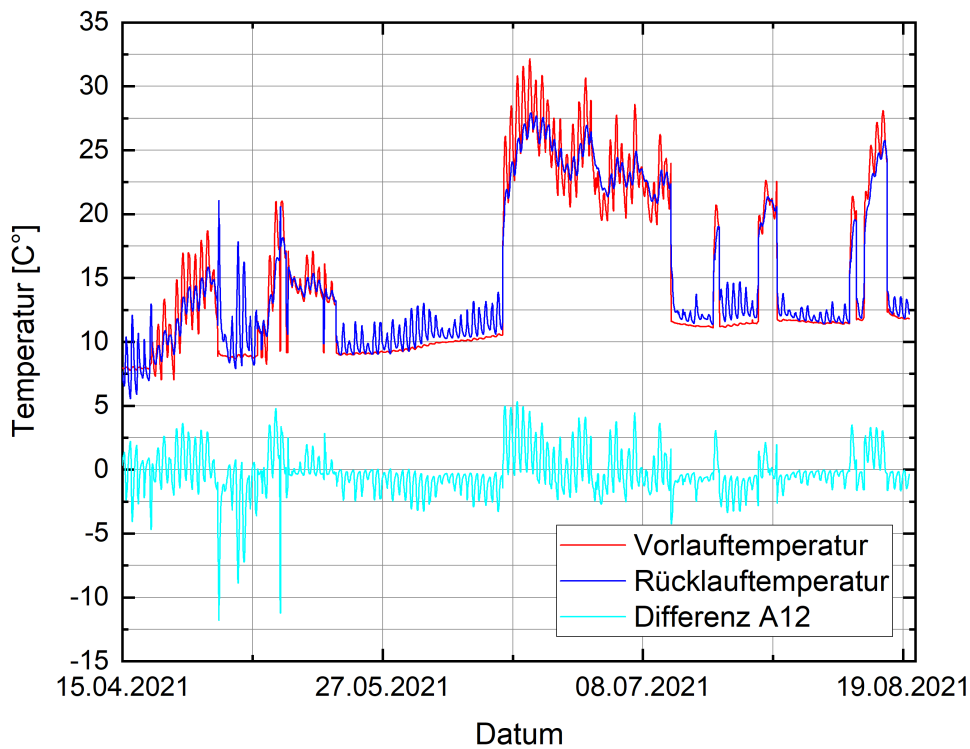


Abb. 2-98 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

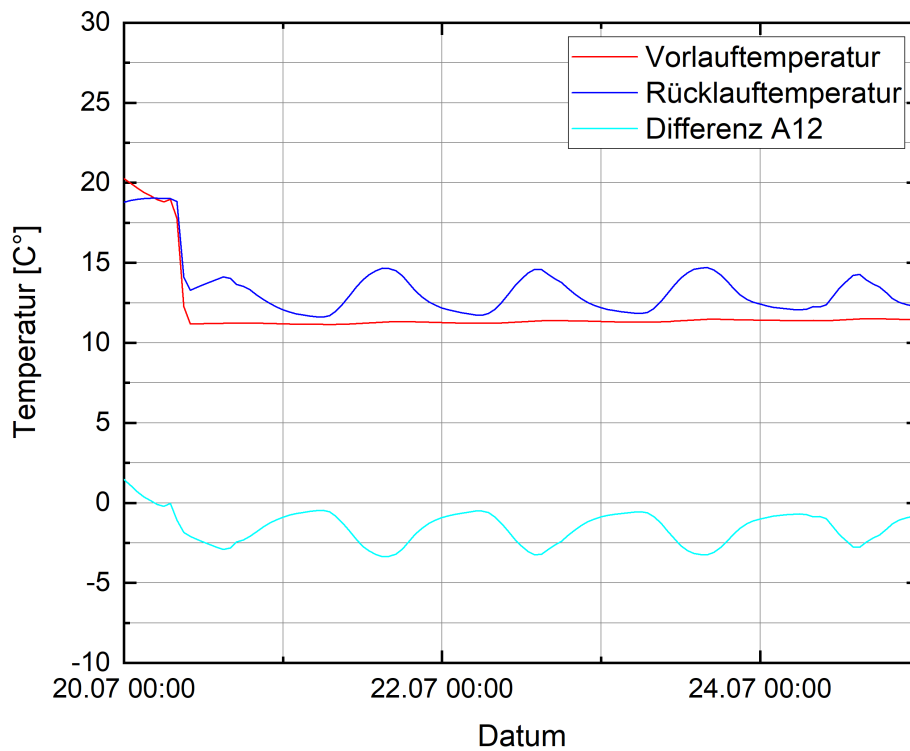


Abb. 2-99 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

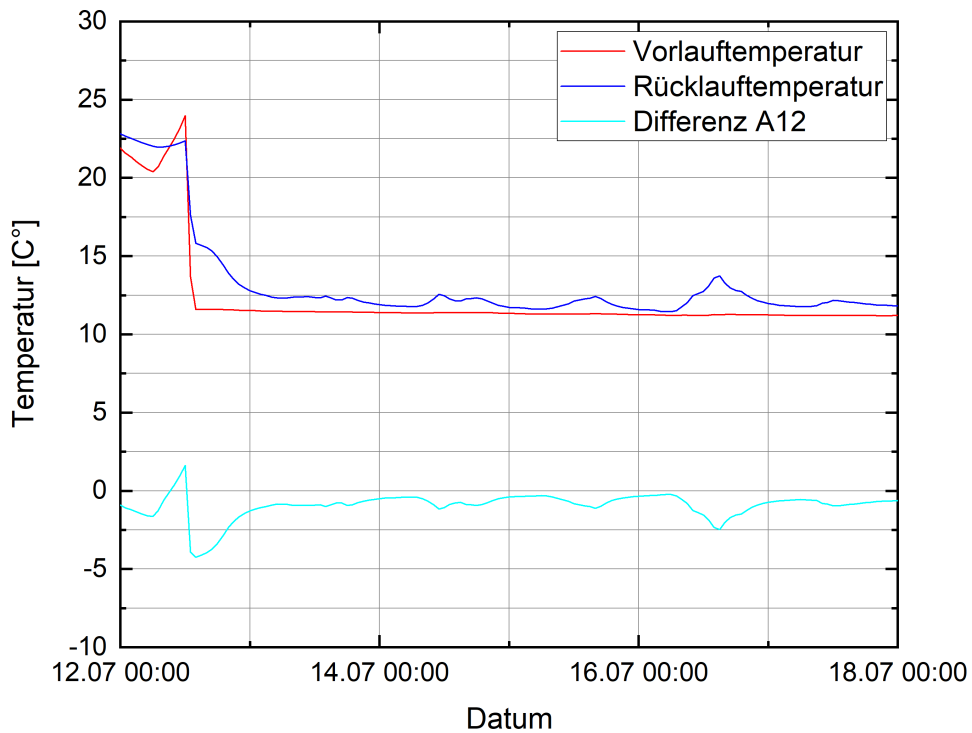


Abb. 2-100 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

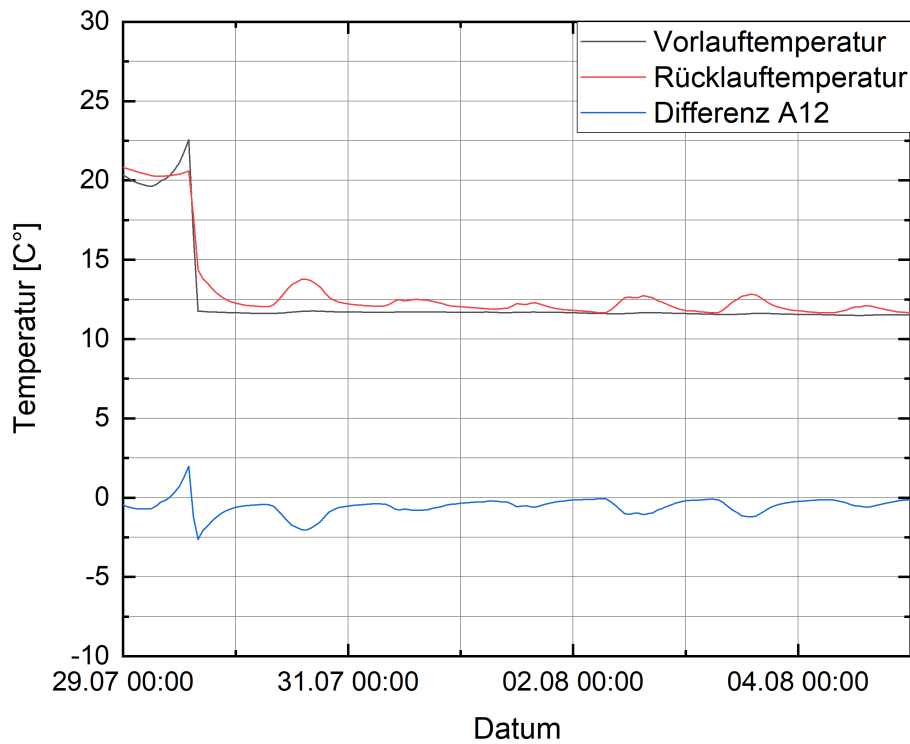


Abb. 2-101 Testfeld A1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

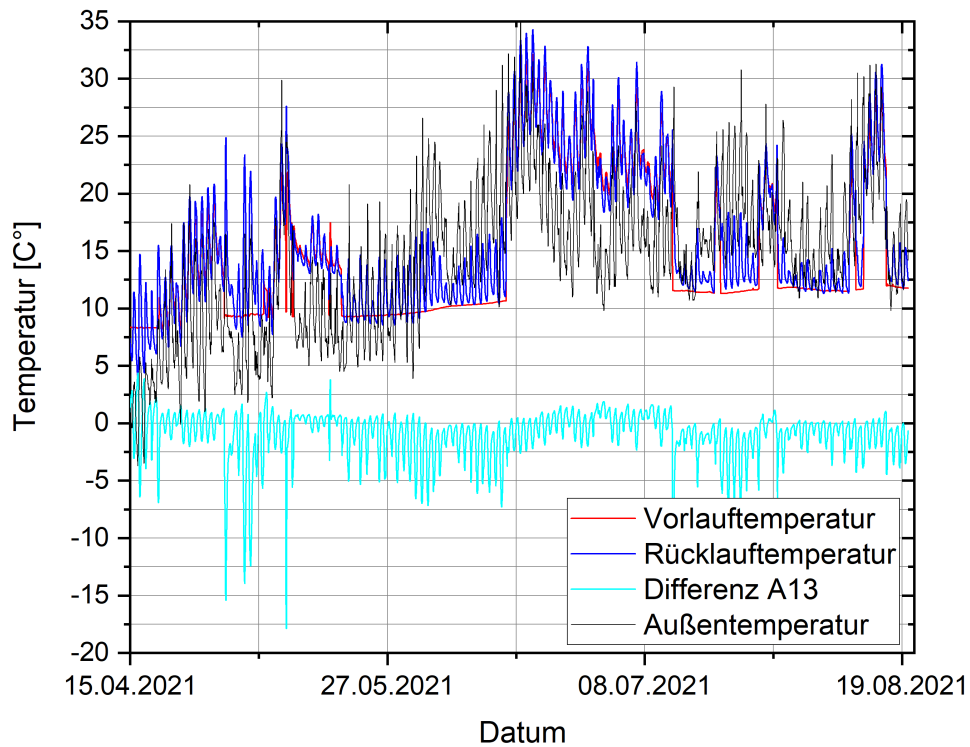


Abb. 2-102 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

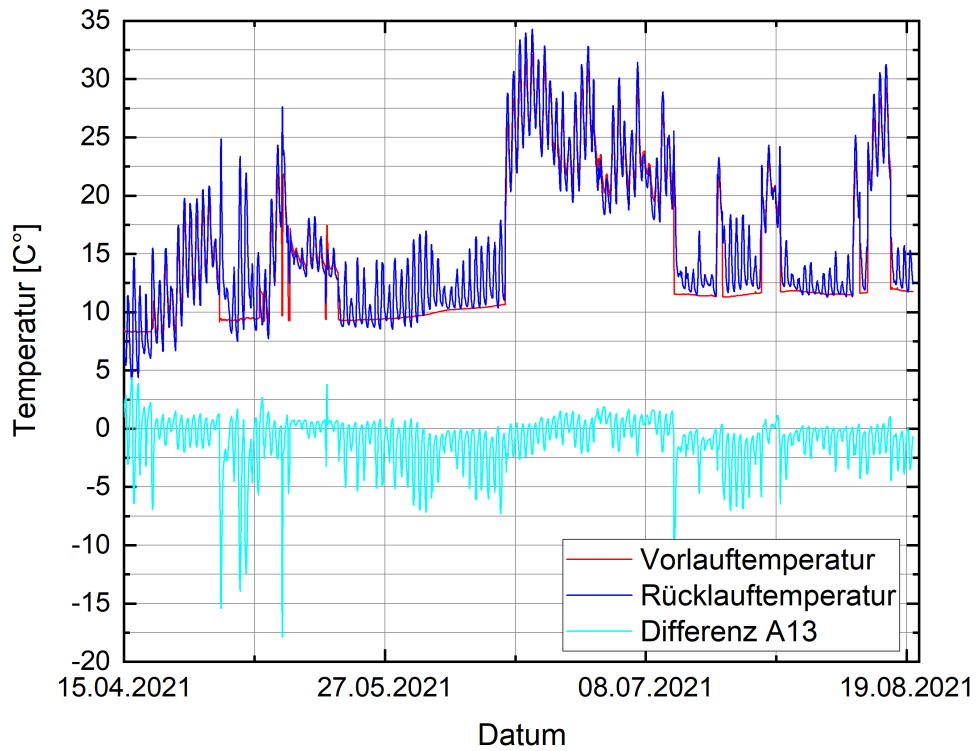


Abb. 2-103 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

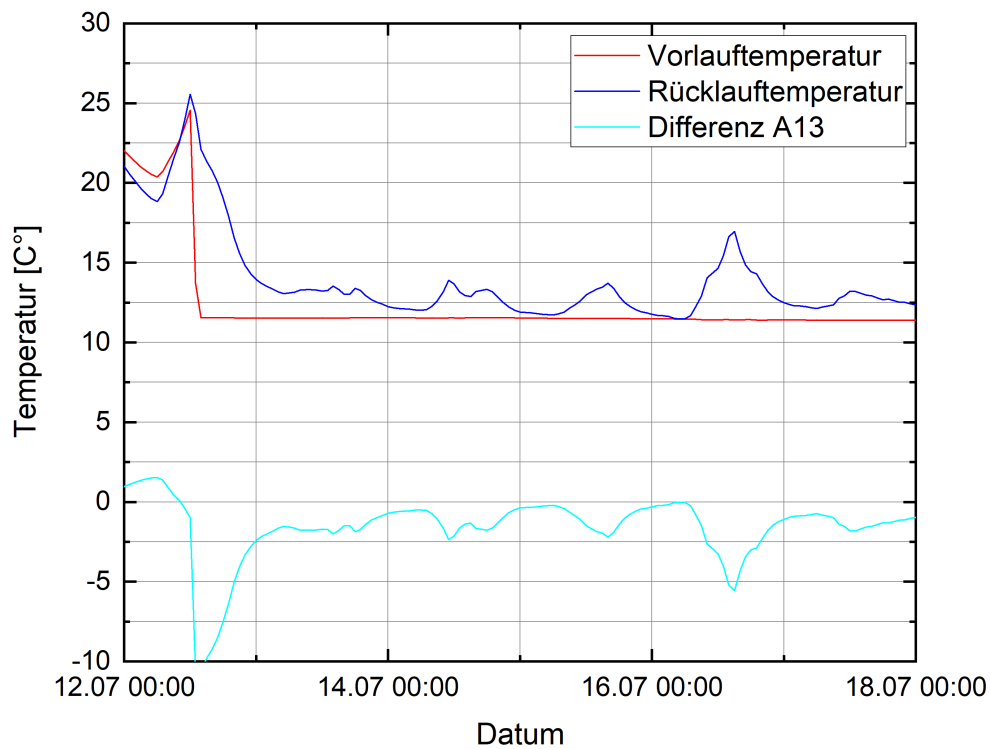


Abb. 2-104 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

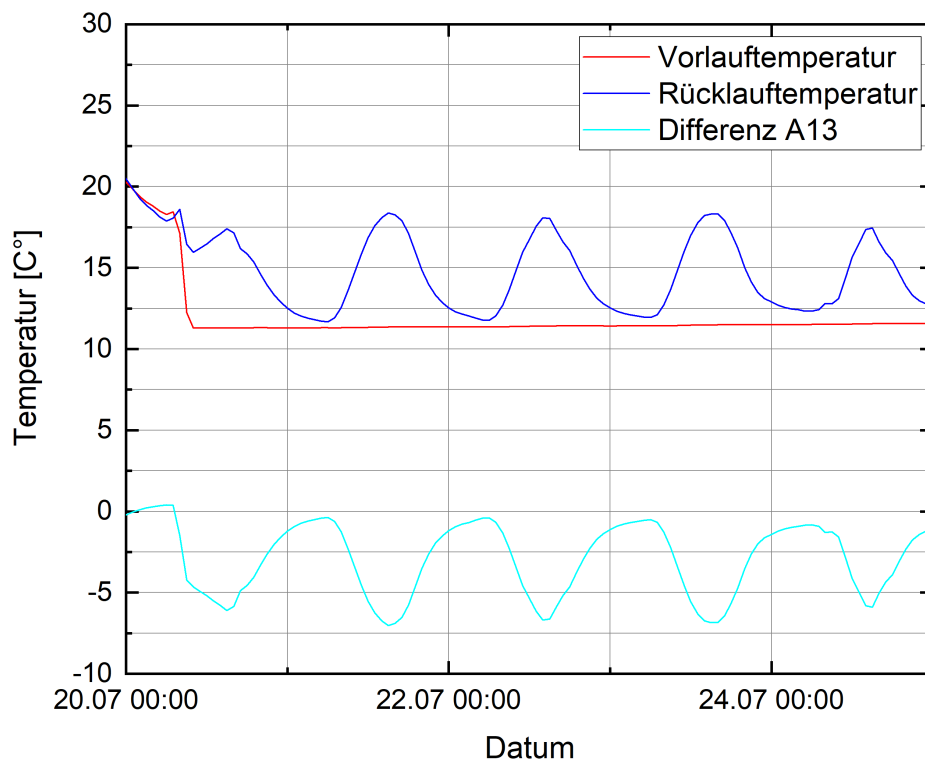


Abb. 2-105 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

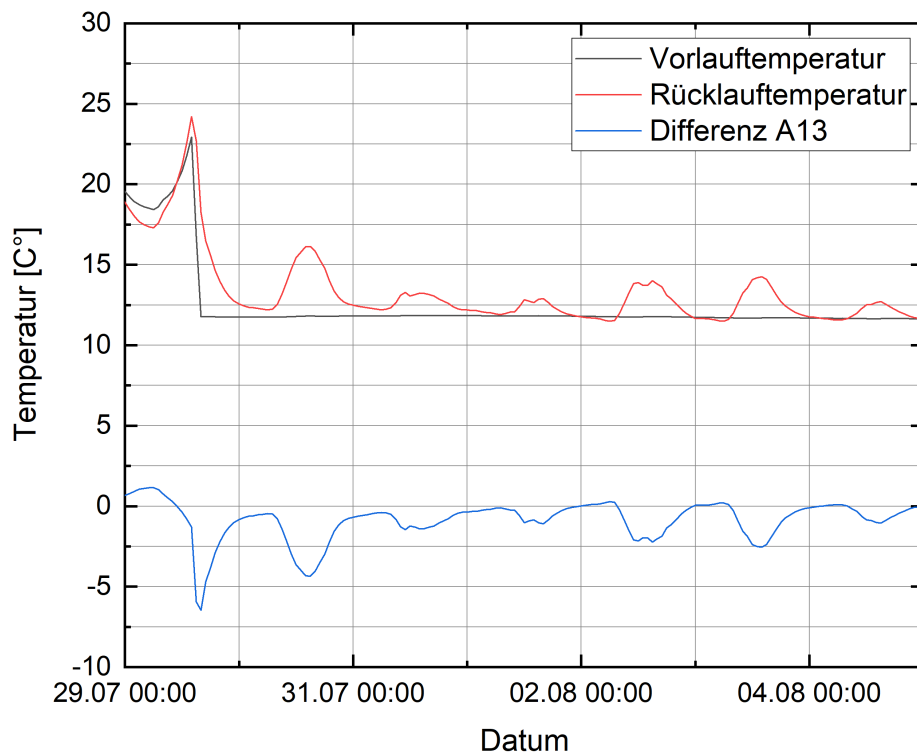


Abb. 2-106 Testfeld A1.3, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz



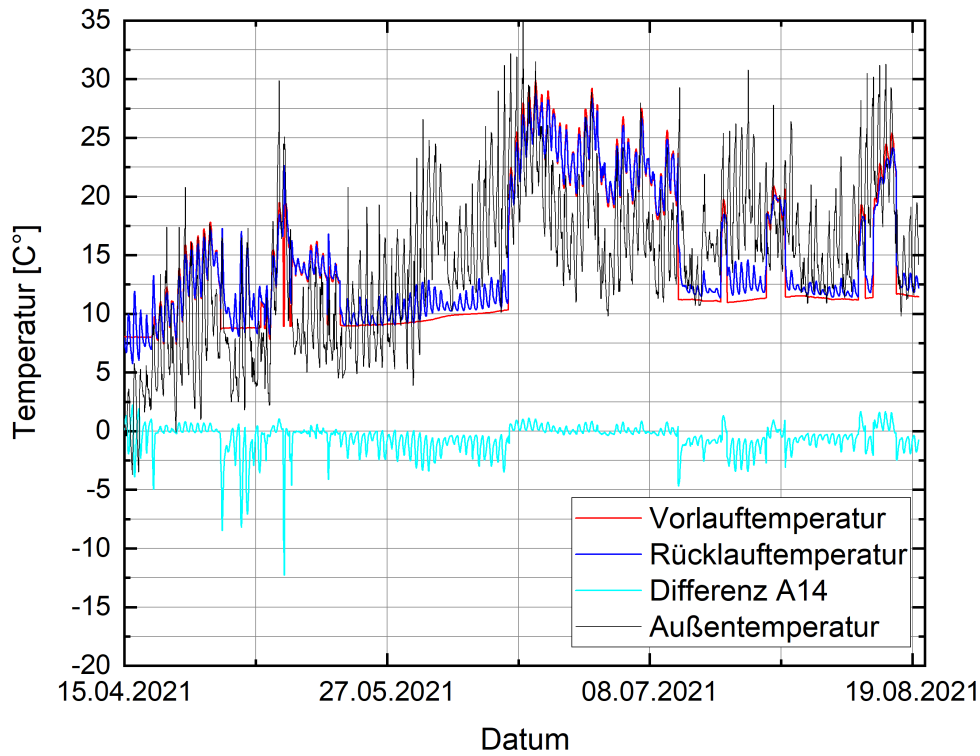


Abb. 2-107 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

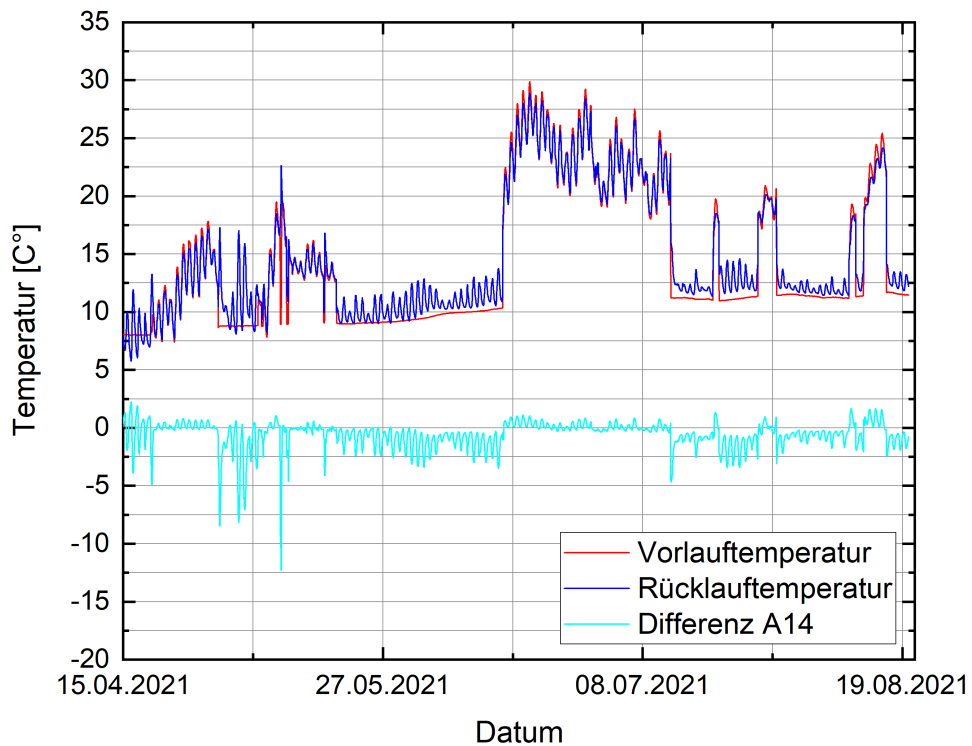


Abb. 2-108 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

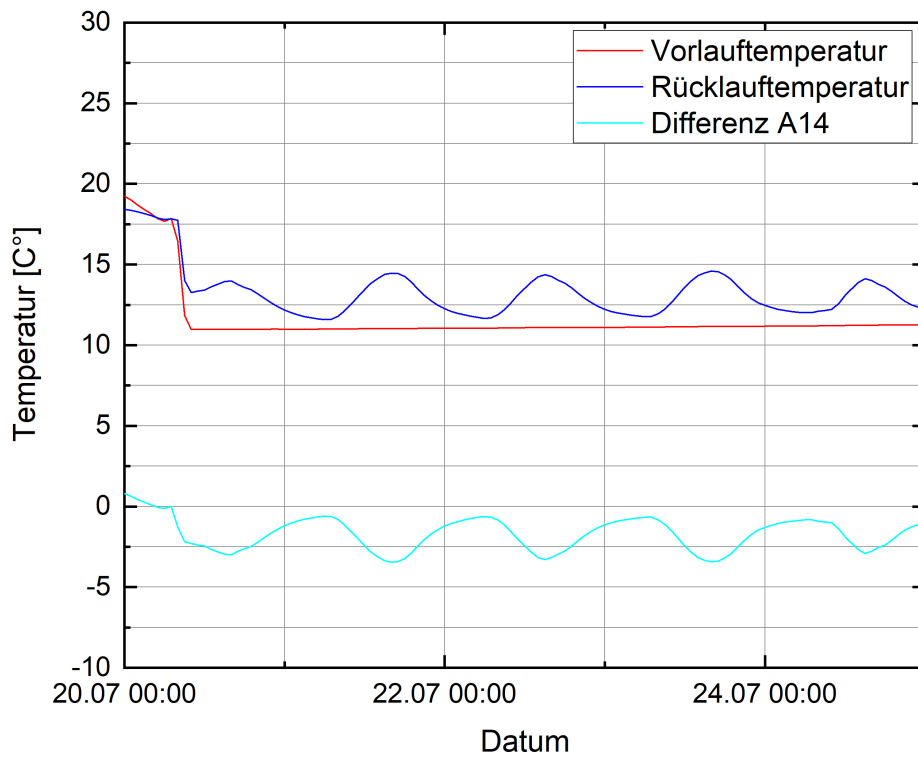


Abb. 2-109 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

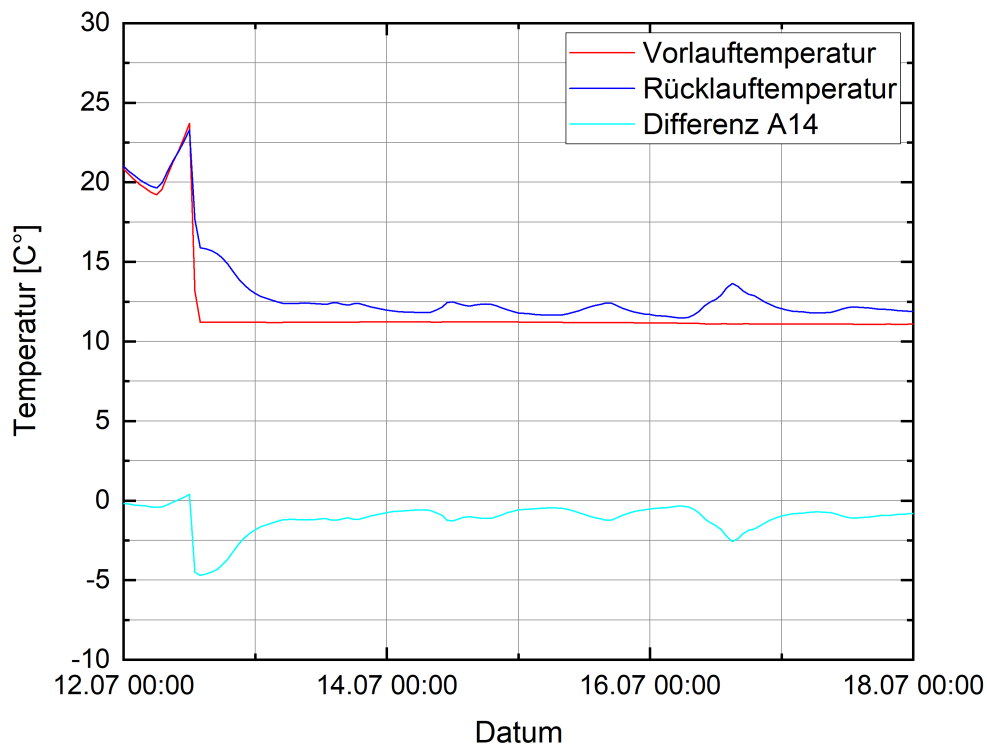


Abb. 2-110 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

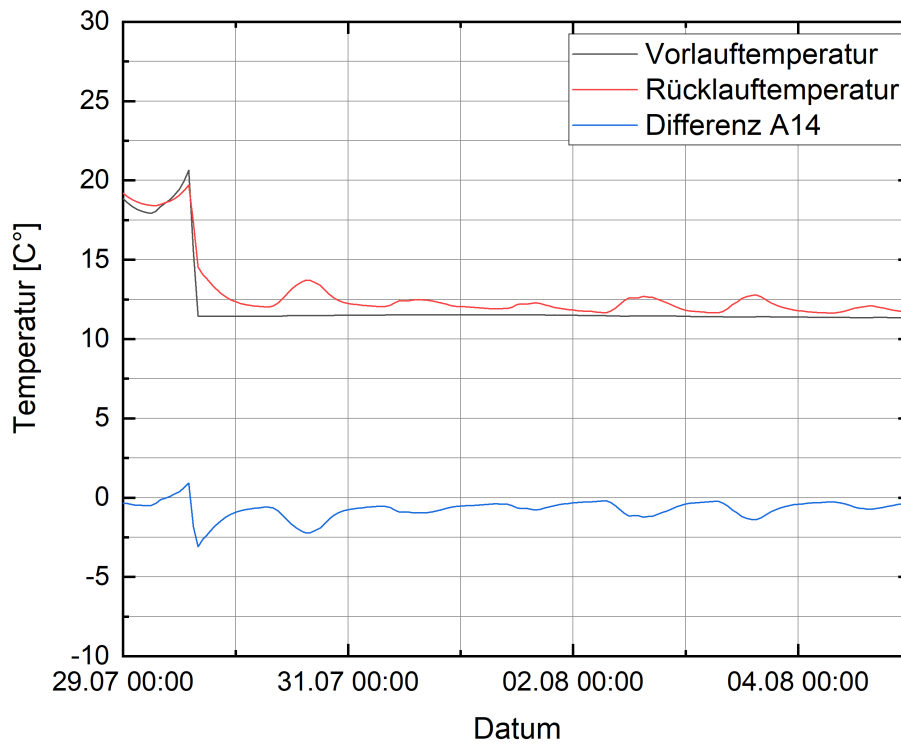


Abb. 2-111 Testfeld A1.4, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

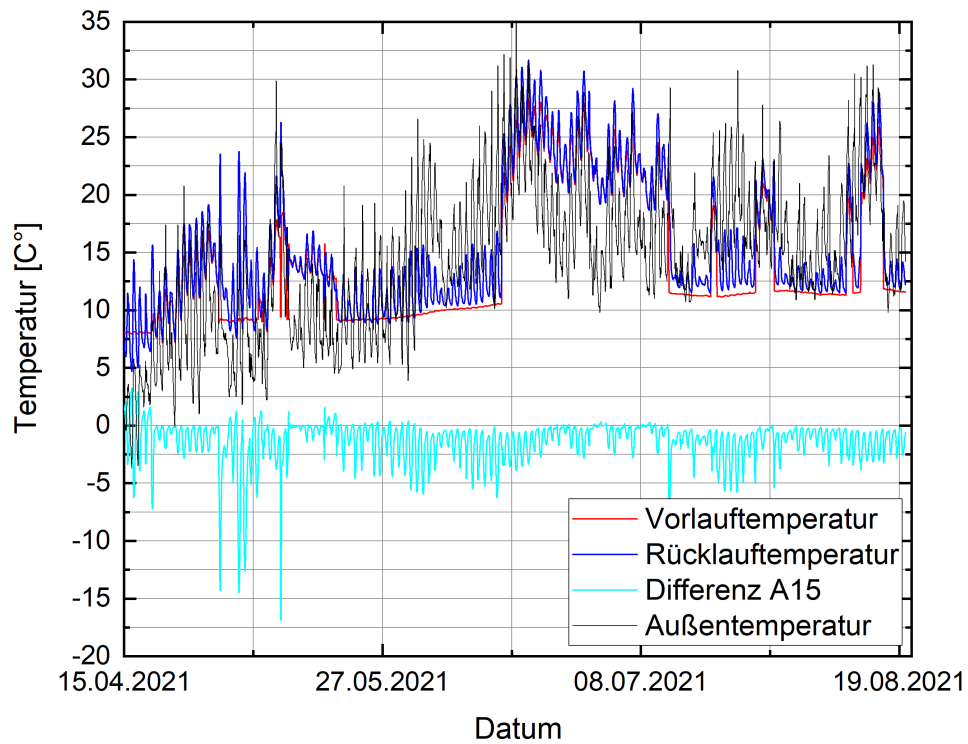


Abb. 2-112 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

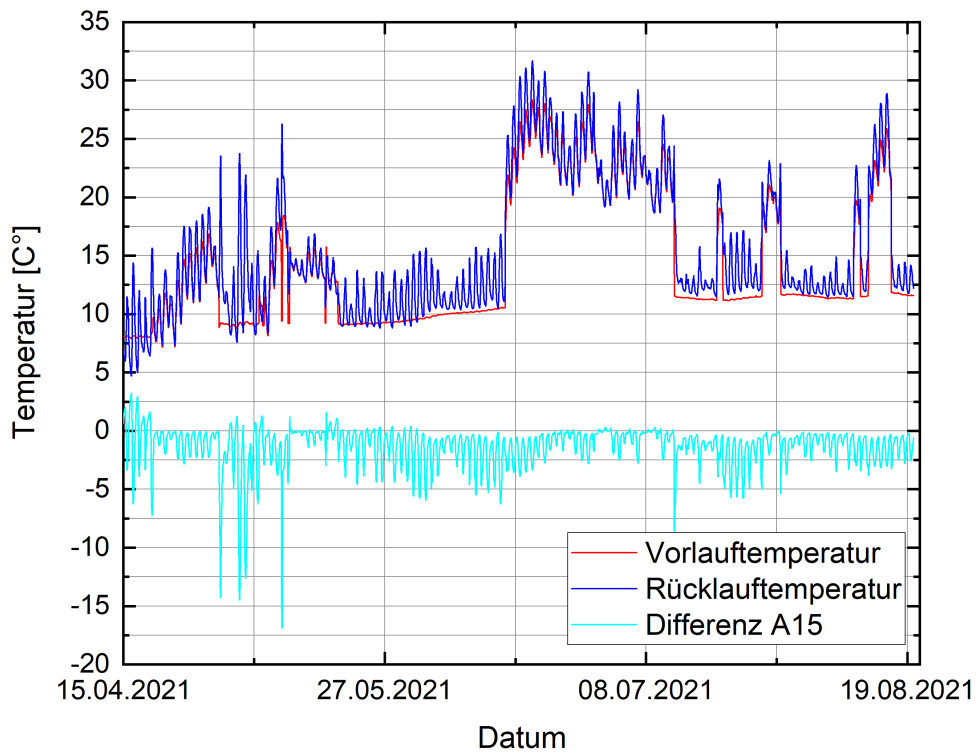


Abb. 2-113 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

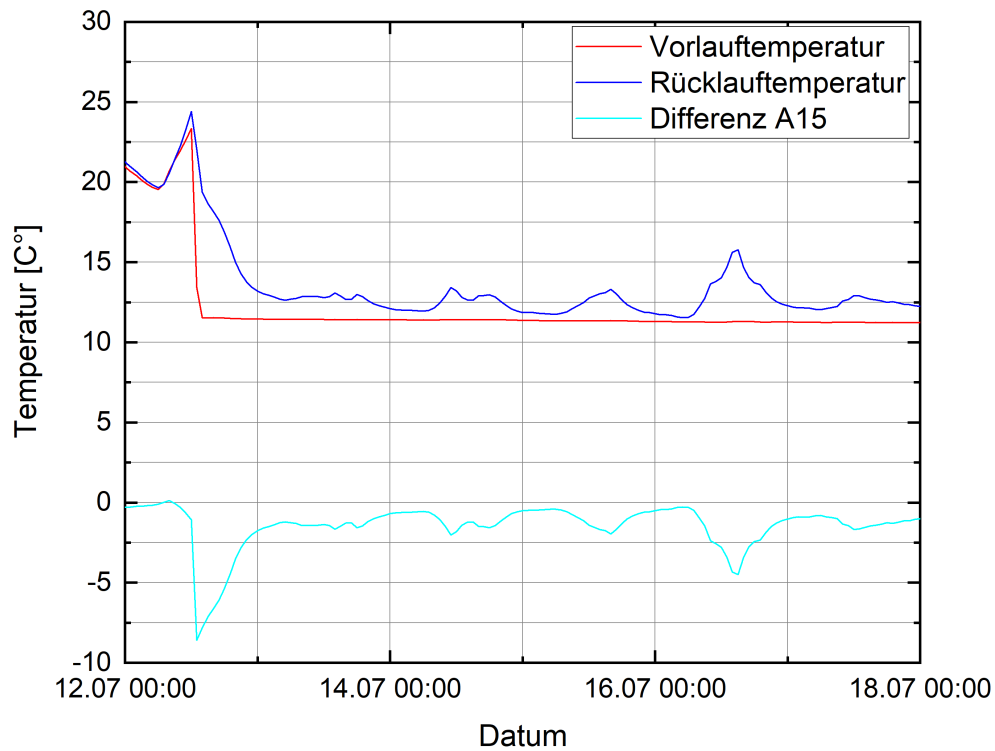


Abb. 2-114 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

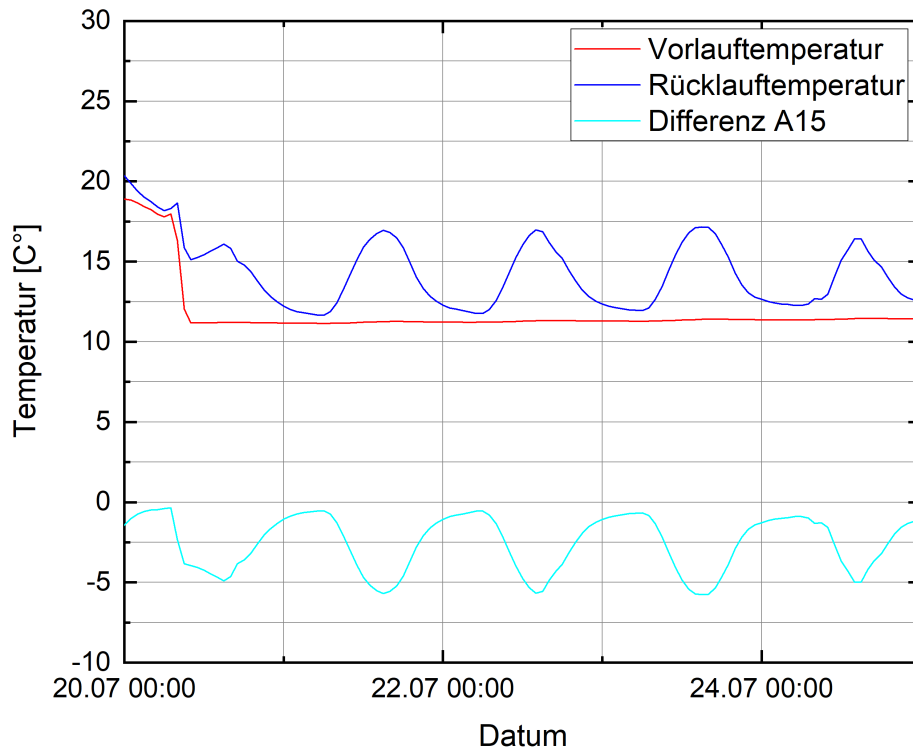


Abb. 2-115 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

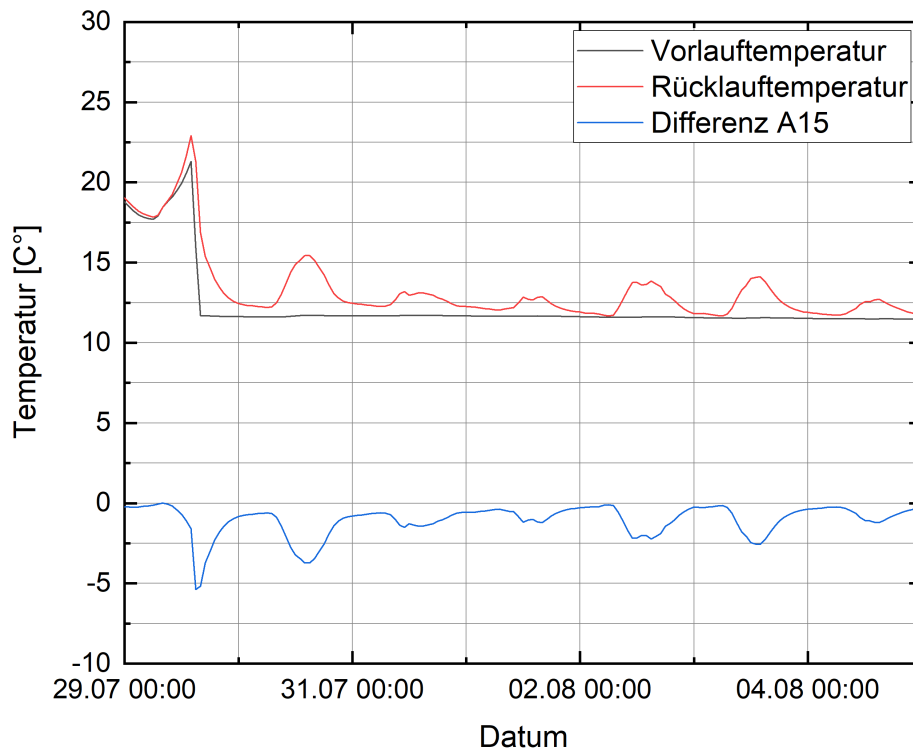


Abb. 2-116 Testfeld A1.5, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

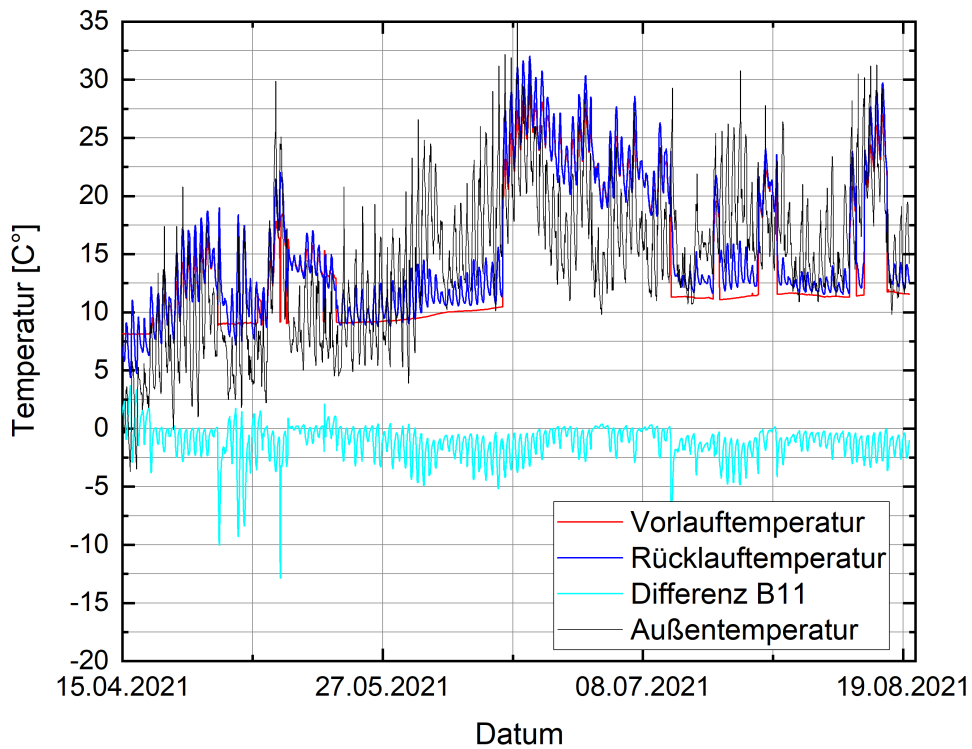


Abb. 2-117 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur

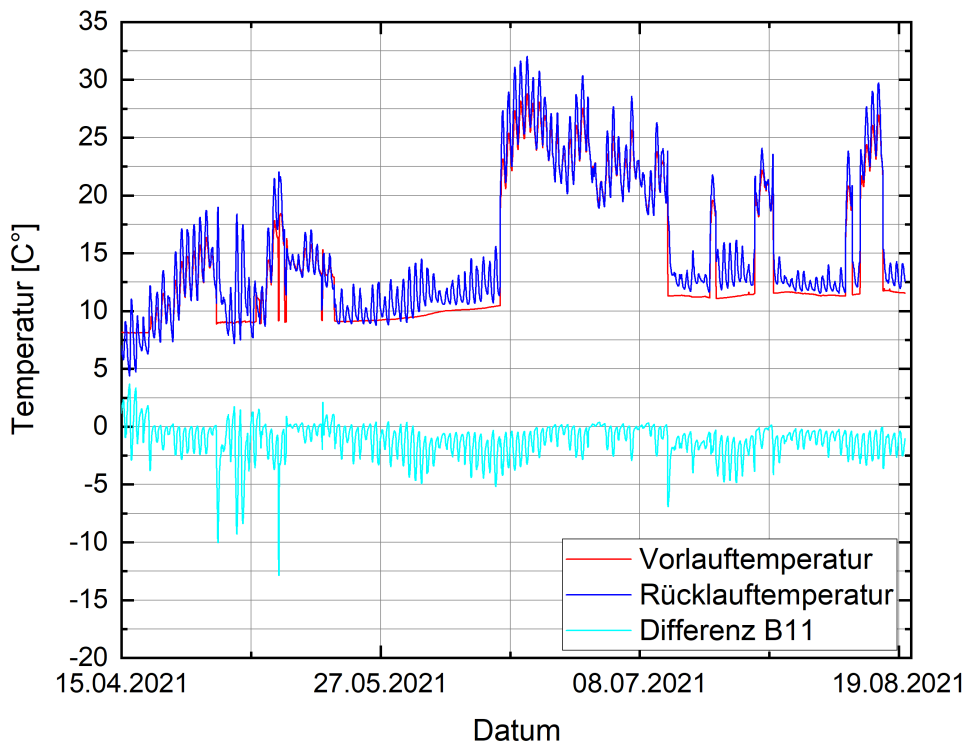


Abb. 2-118 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

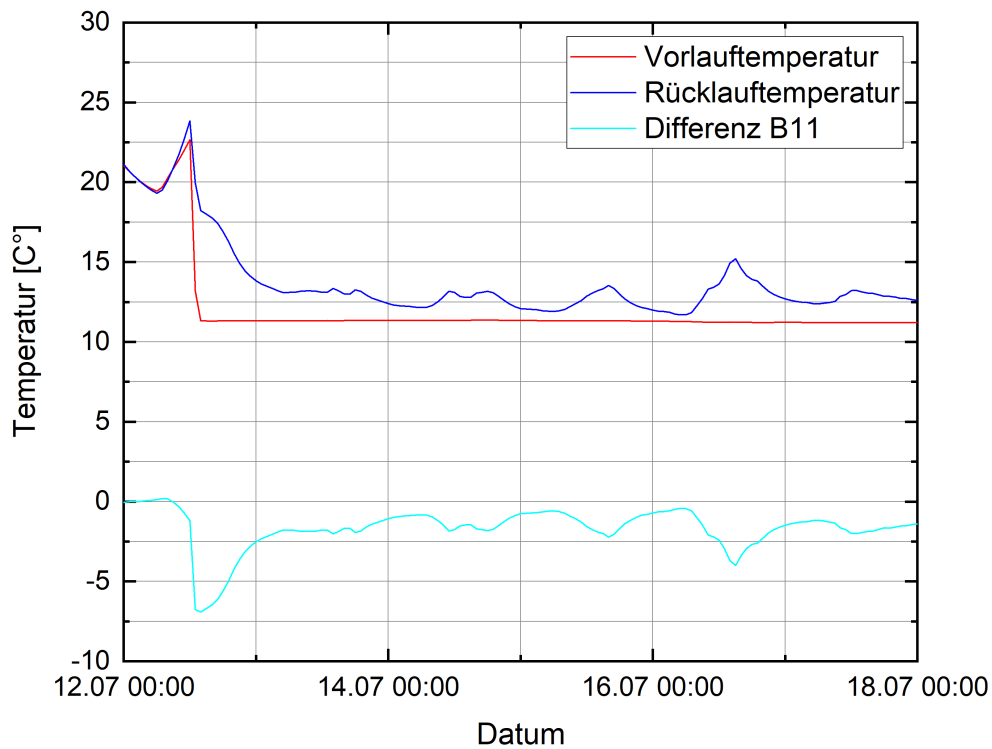


Abb. 2-119 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

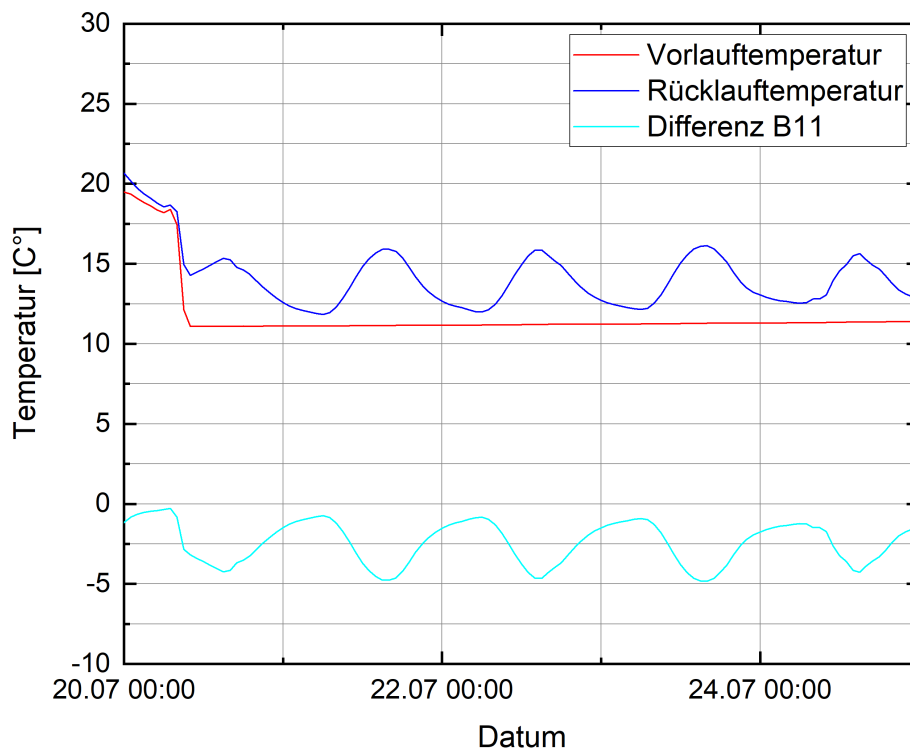


Abb. 2-120 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

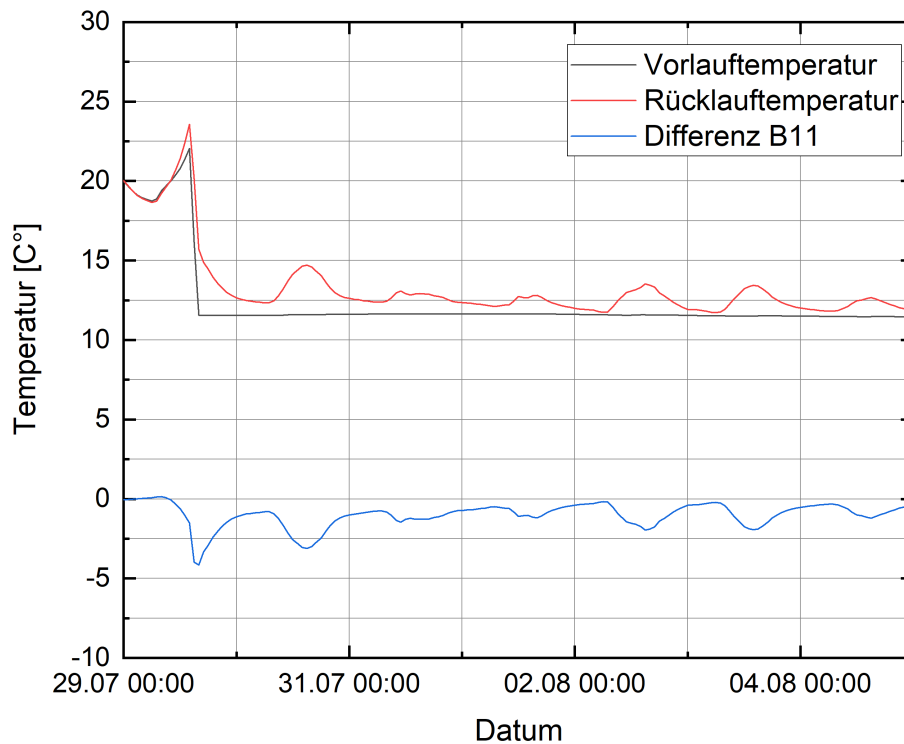


Abb. 2-121 Testfeld B1.1, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

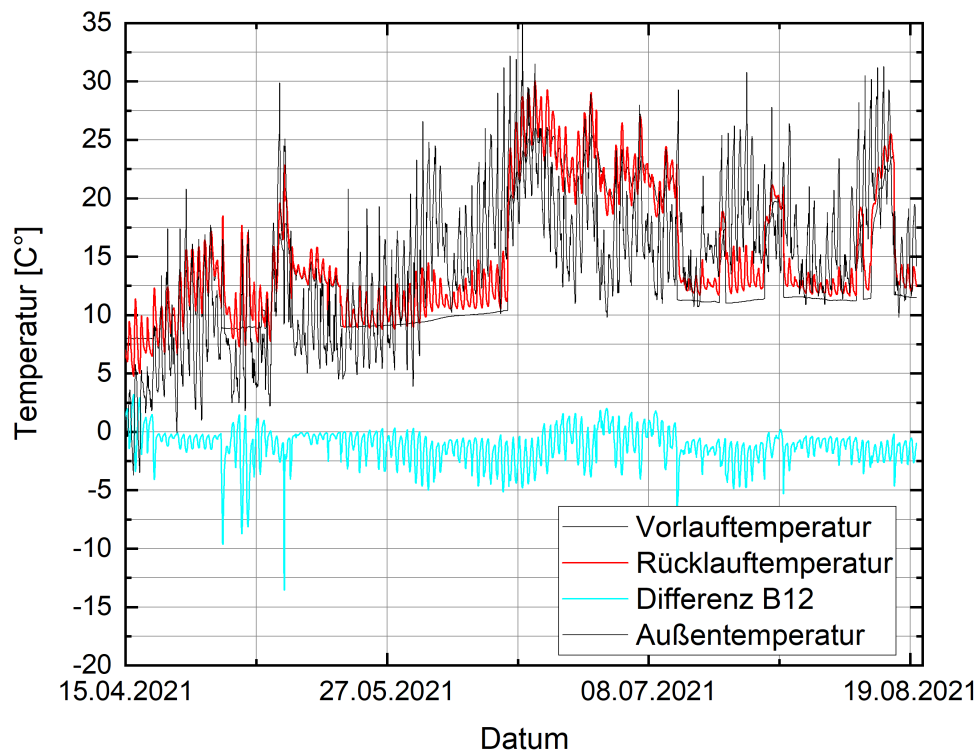


Abb. 2-122 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz mit Außentemperatur



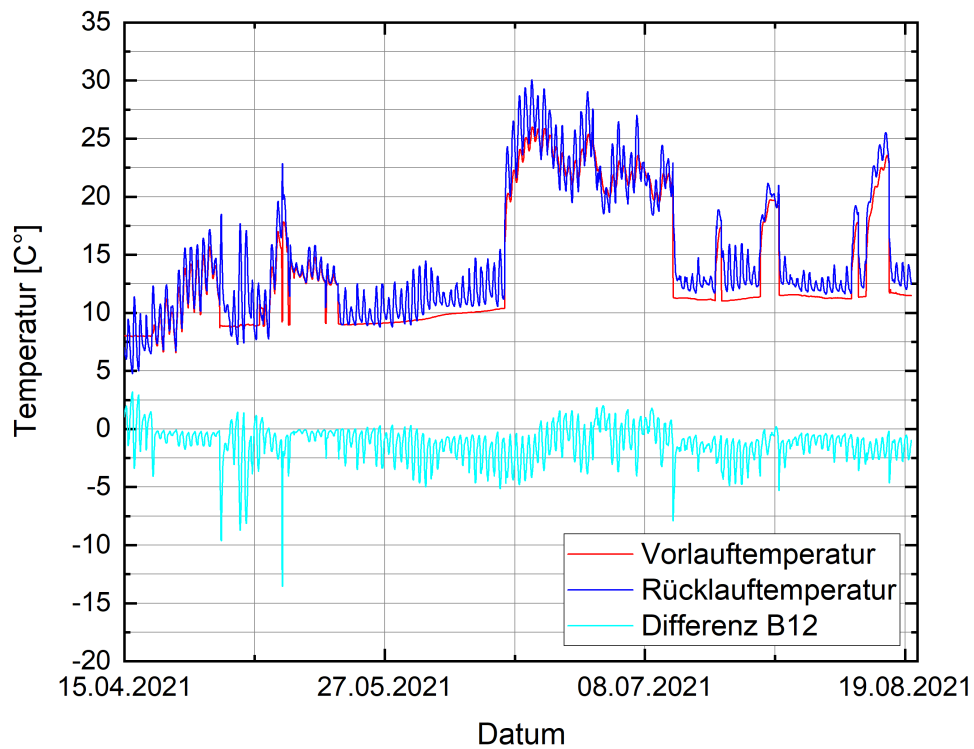


Abb. 2-123 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

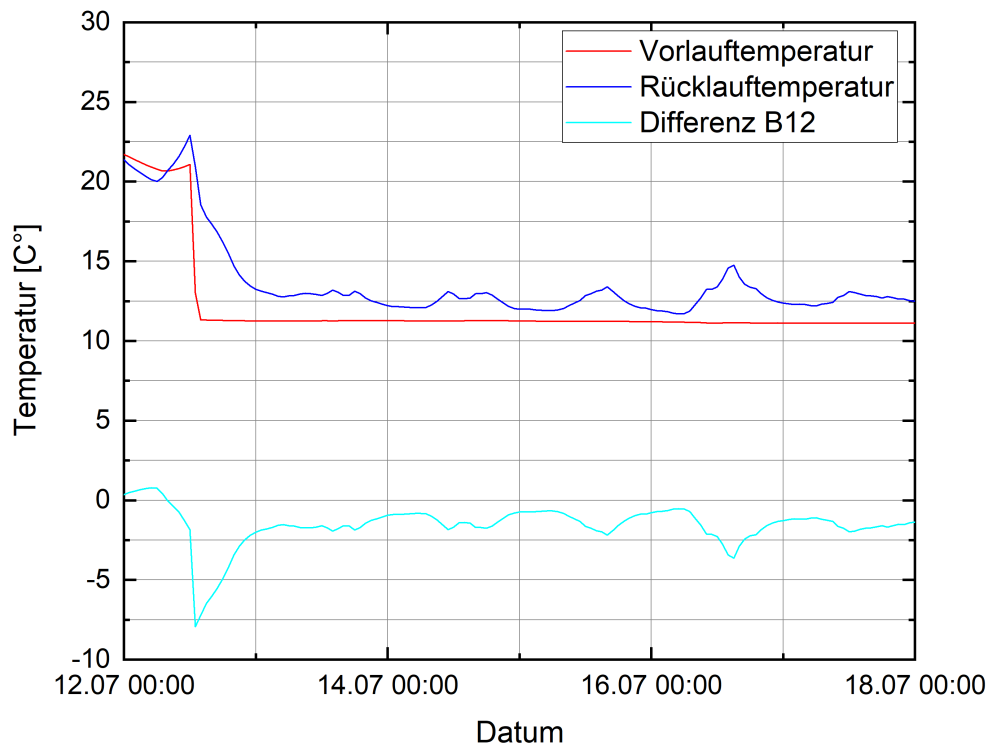


Abb. 2-124 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

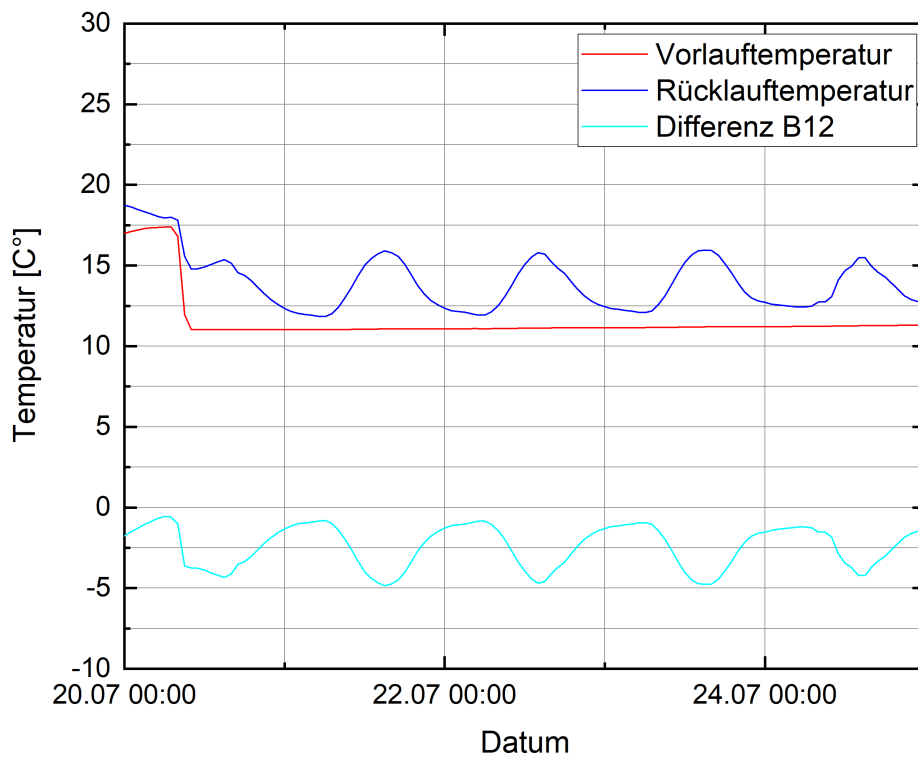


Abb. 2-125 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

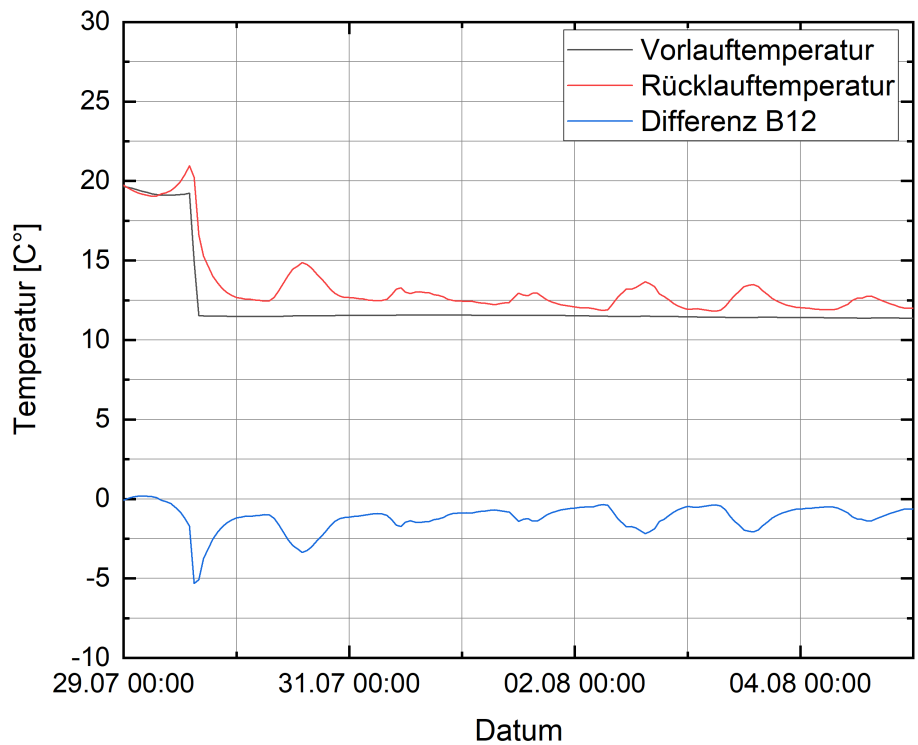


Abb. 2-126 Testfeld B1.2, Vor- und Rücklauftemperaturen, Differenz

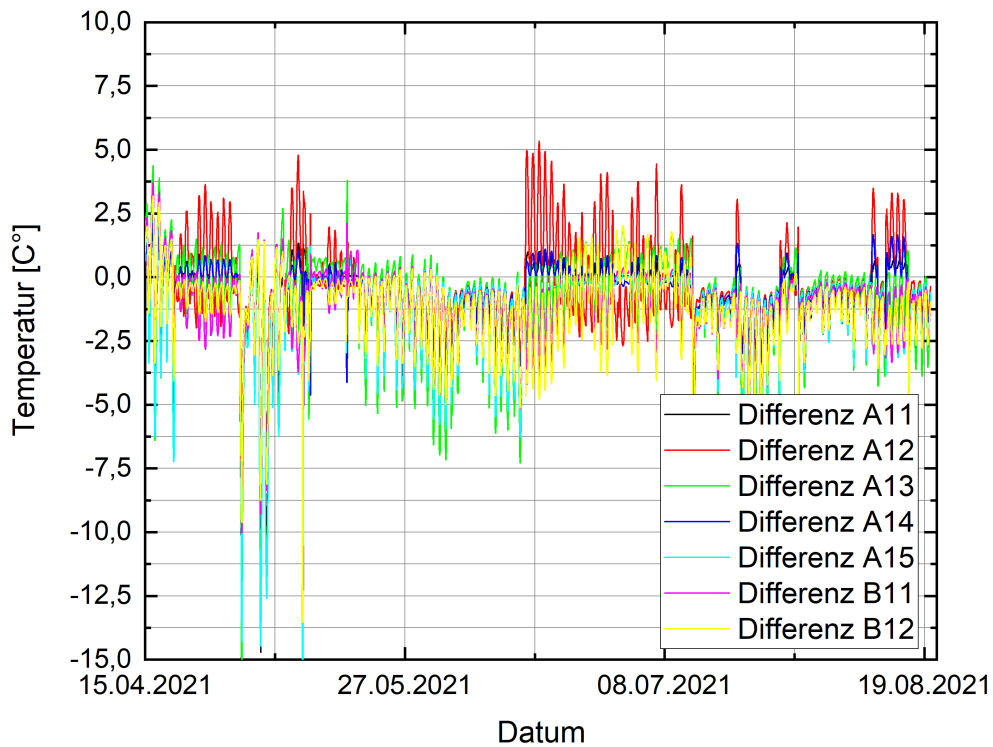


Abb. 2-127 Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder

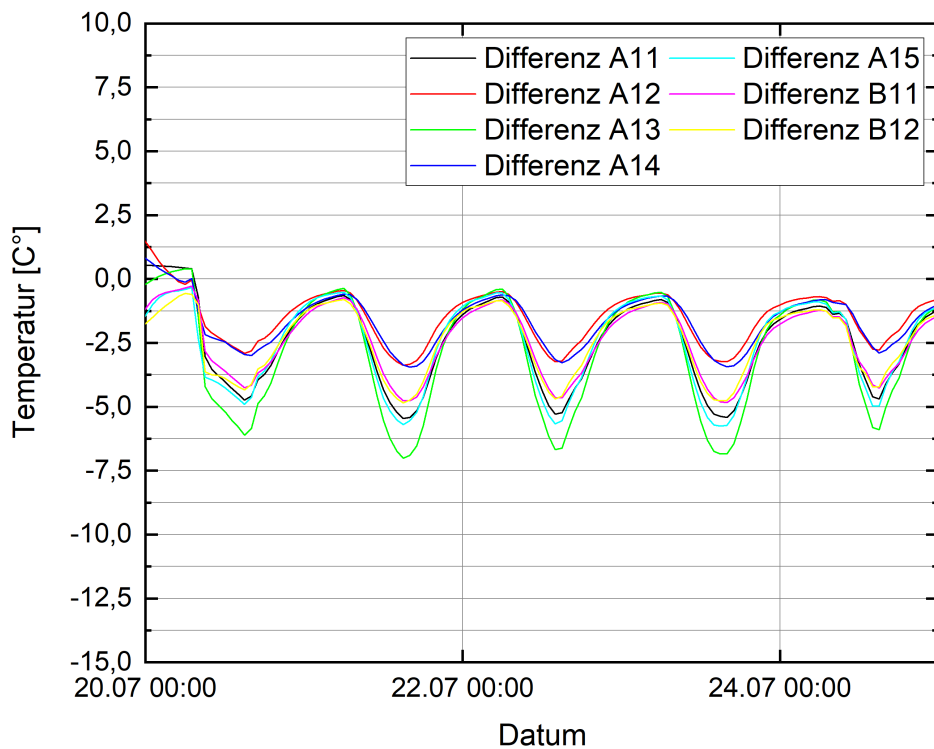


Abb. 2-128 Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder

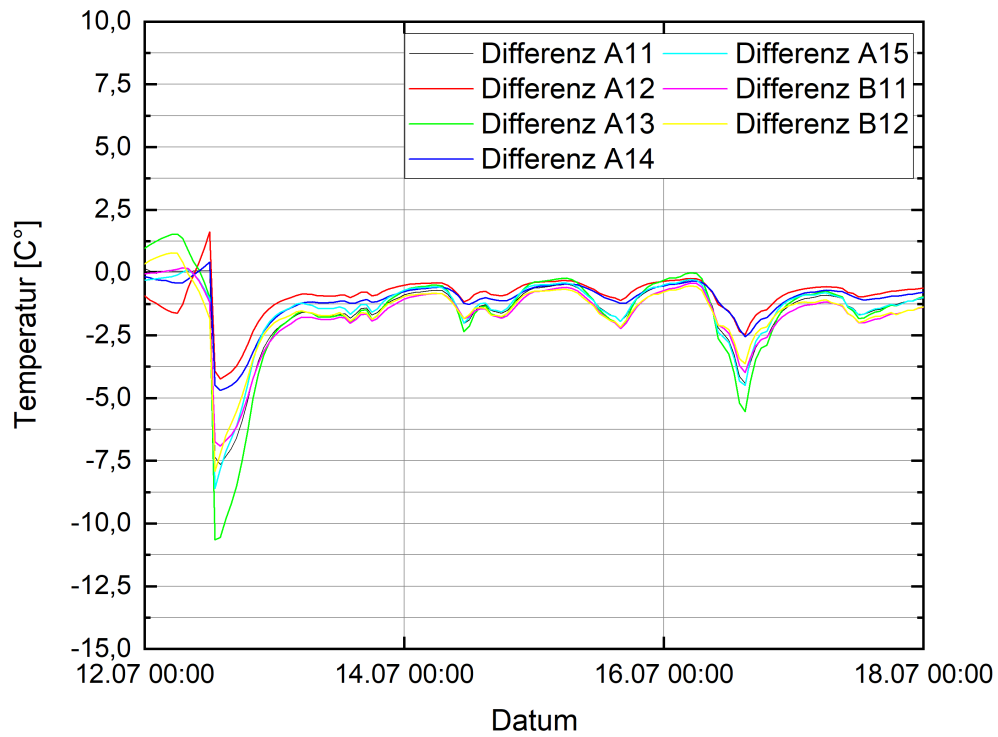


Abb. 2-129 Temperaturdifferenz der Vor- und Rückläufe aller Testfelder



## 2.6 Vergleich der Wärmeströme

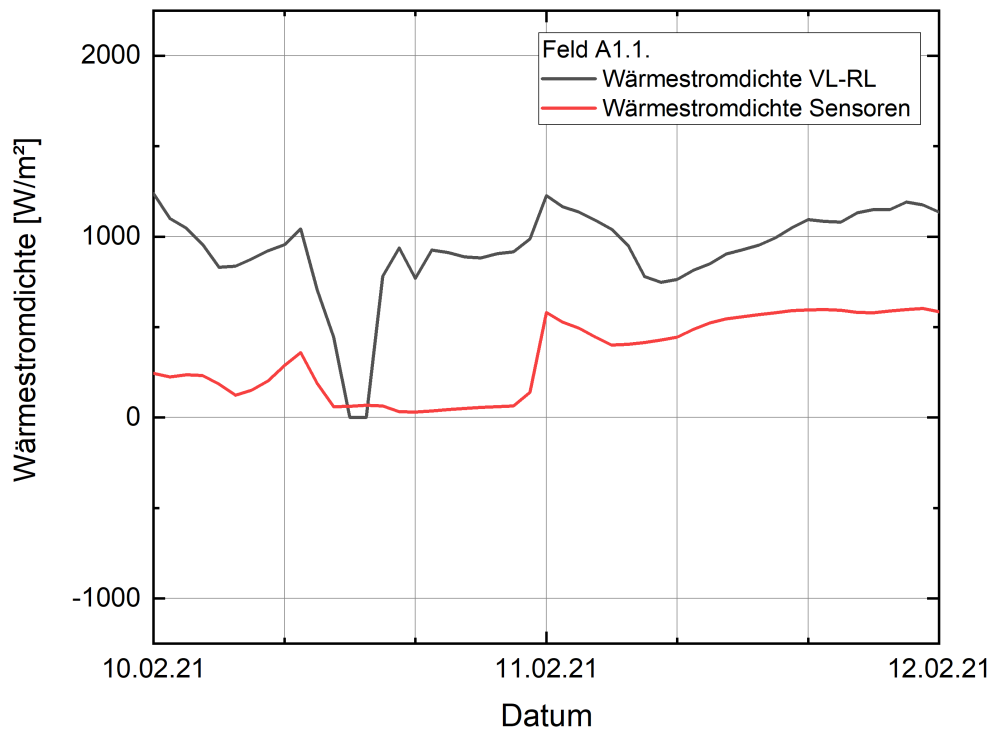


Abb. 2-130 Testfeld A1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

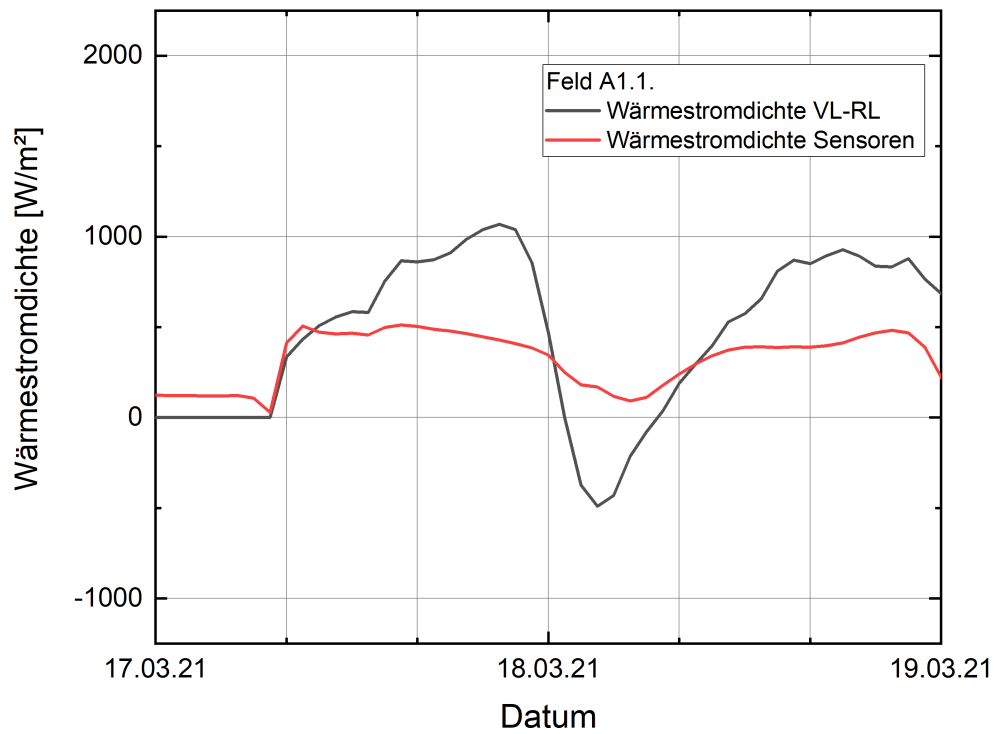


Abb. 2-131 Testfeld A1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

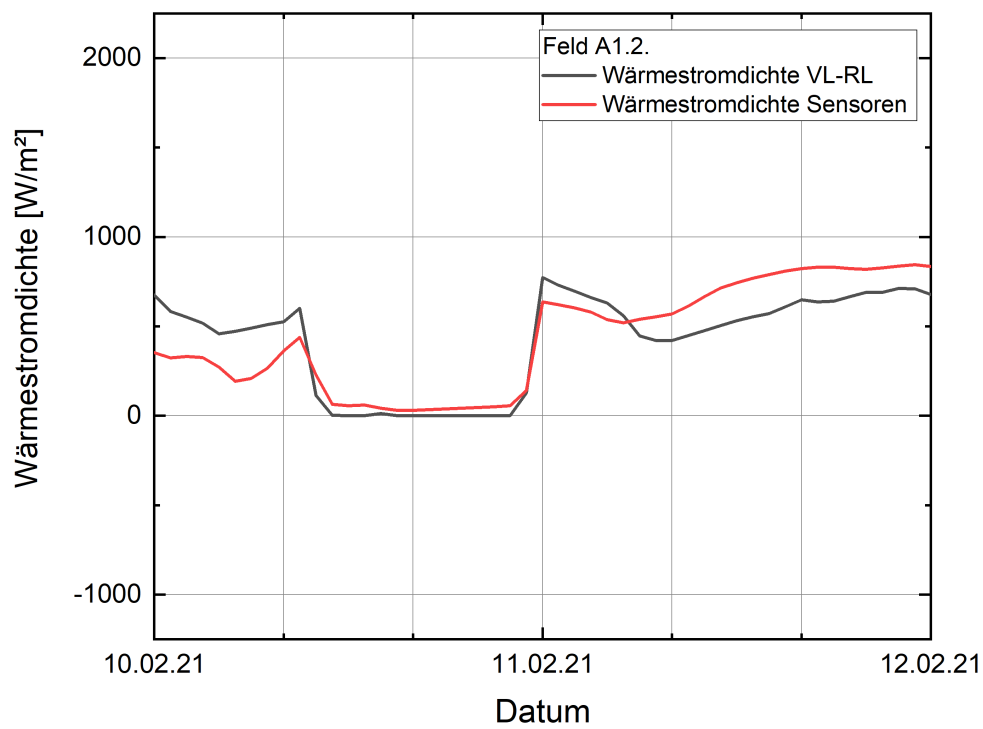


Abb. 2-132 Testfeld A1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

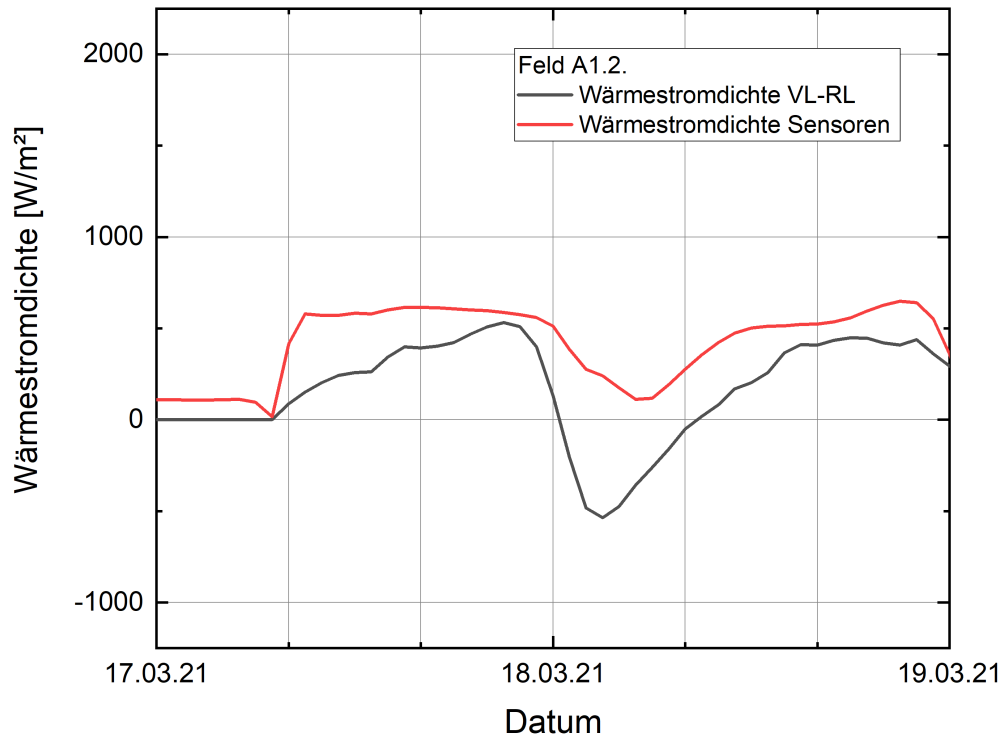


Abb. 2-133 Testfeld A1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

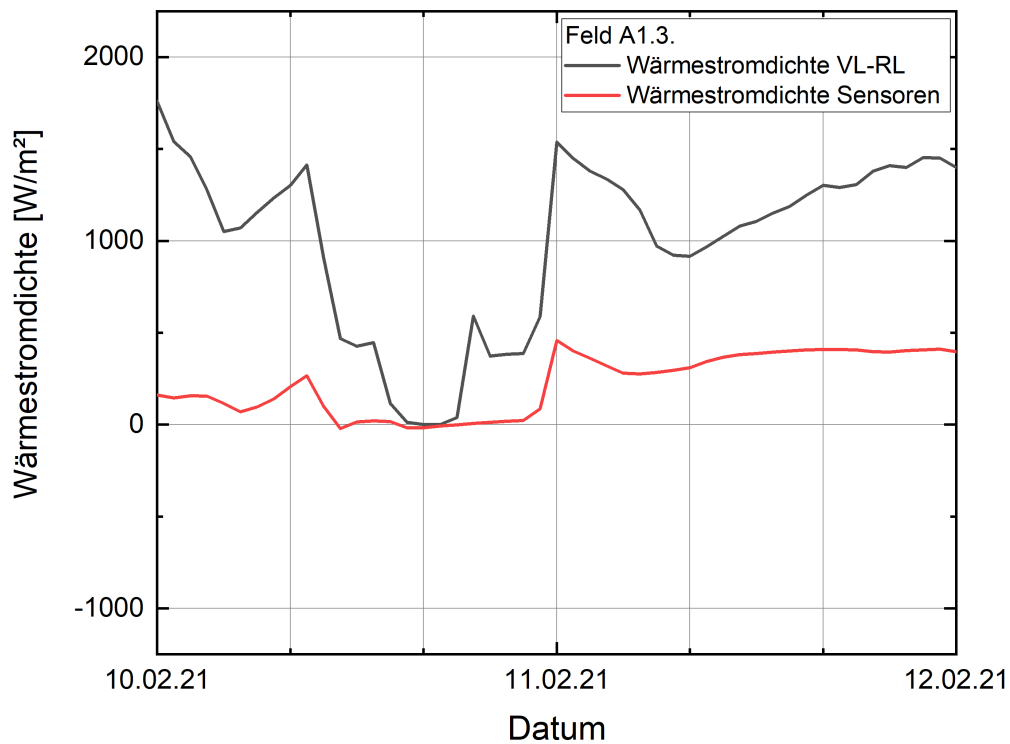


Abb. 2-134 Testfeld A1.3, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

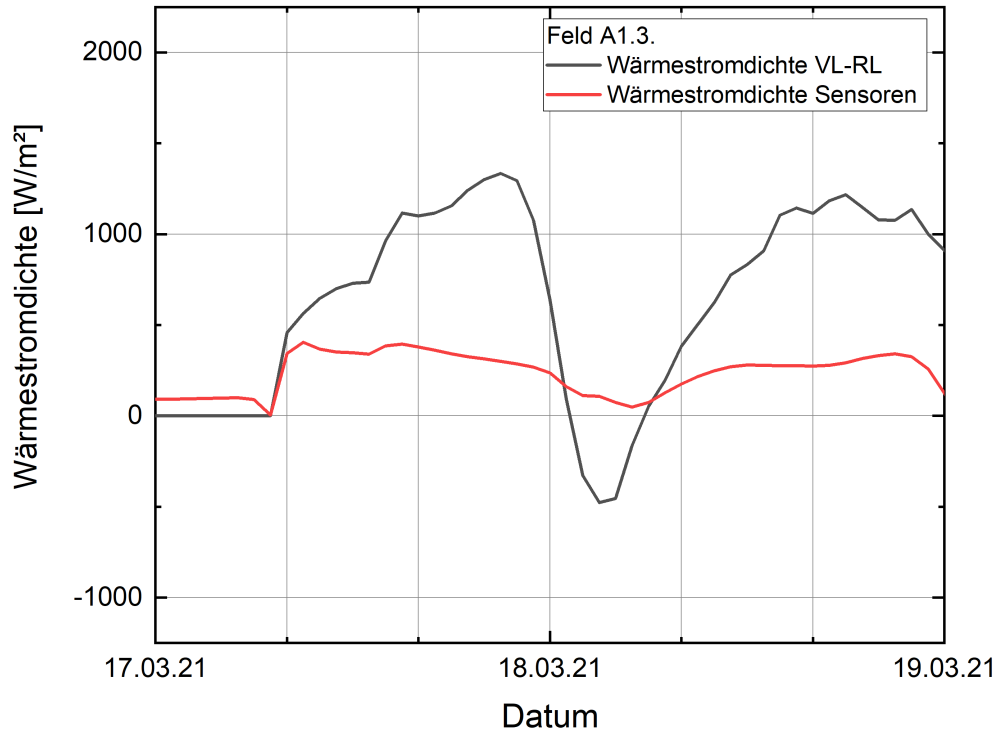


Abb. 2-135 Testfeld A1.3, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

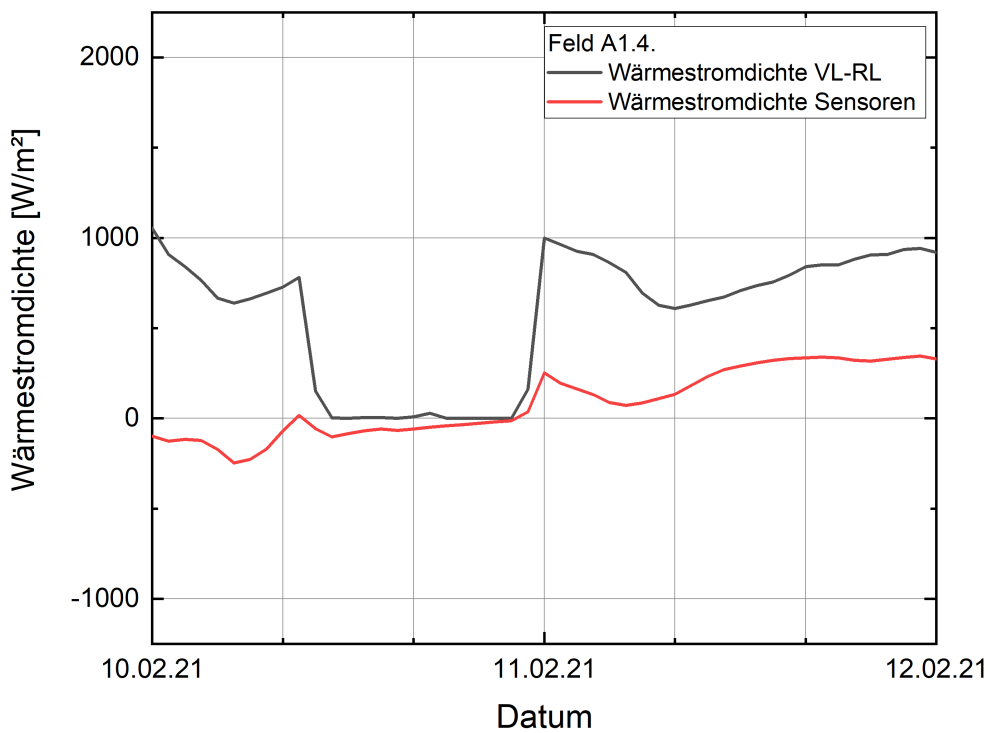


Abb. 2-136 Testfeld A1.4, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren



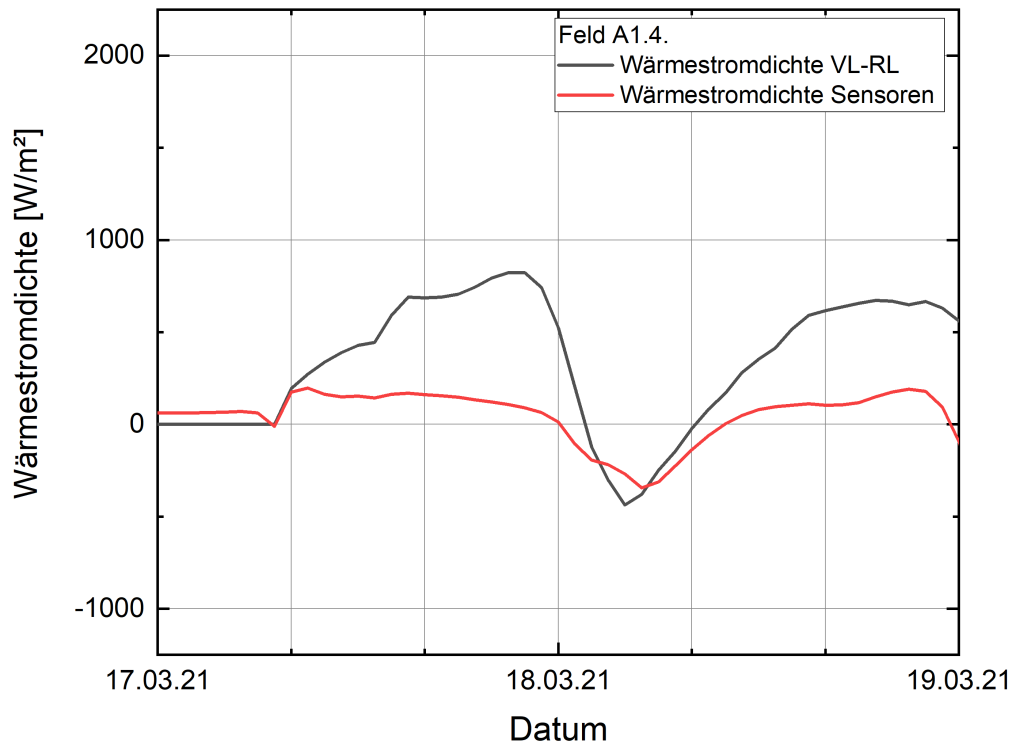


Abb. 2-137 Testfeld A1.4, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

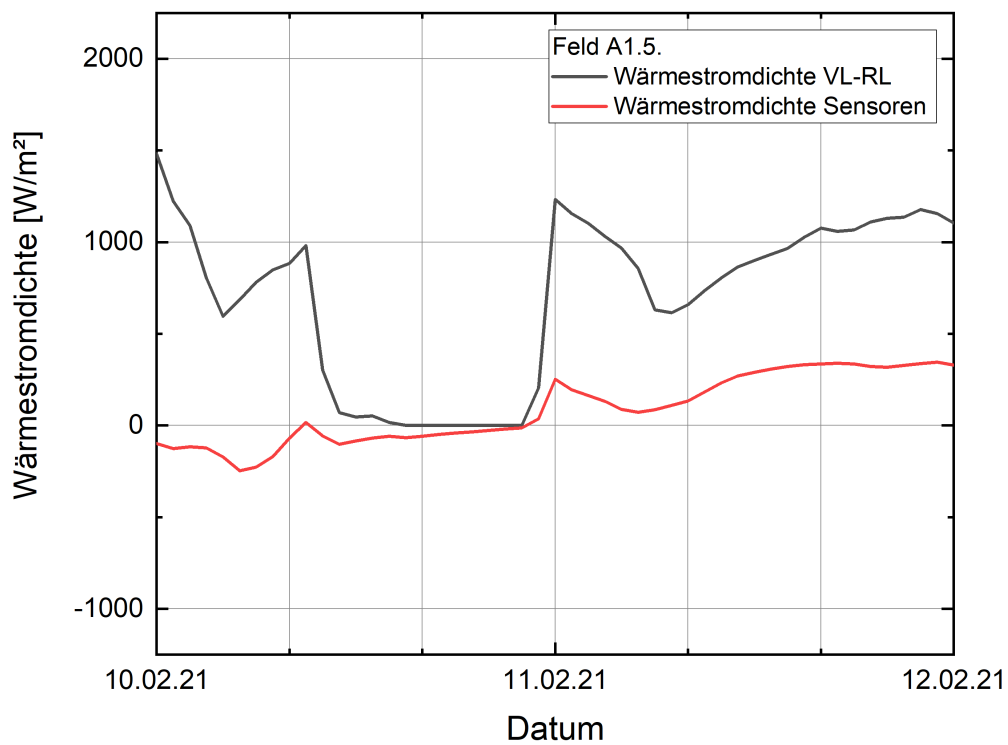


Abb. 2-138 Testfeld A1.5, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

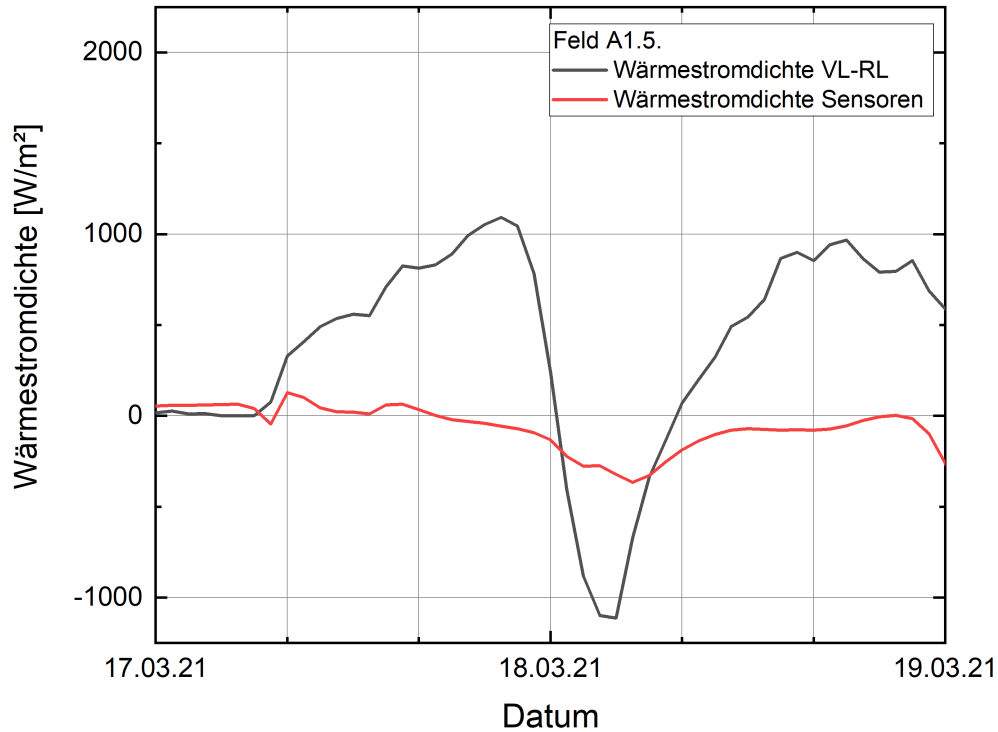


Abb. 2-139 Testfeld A1.5, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

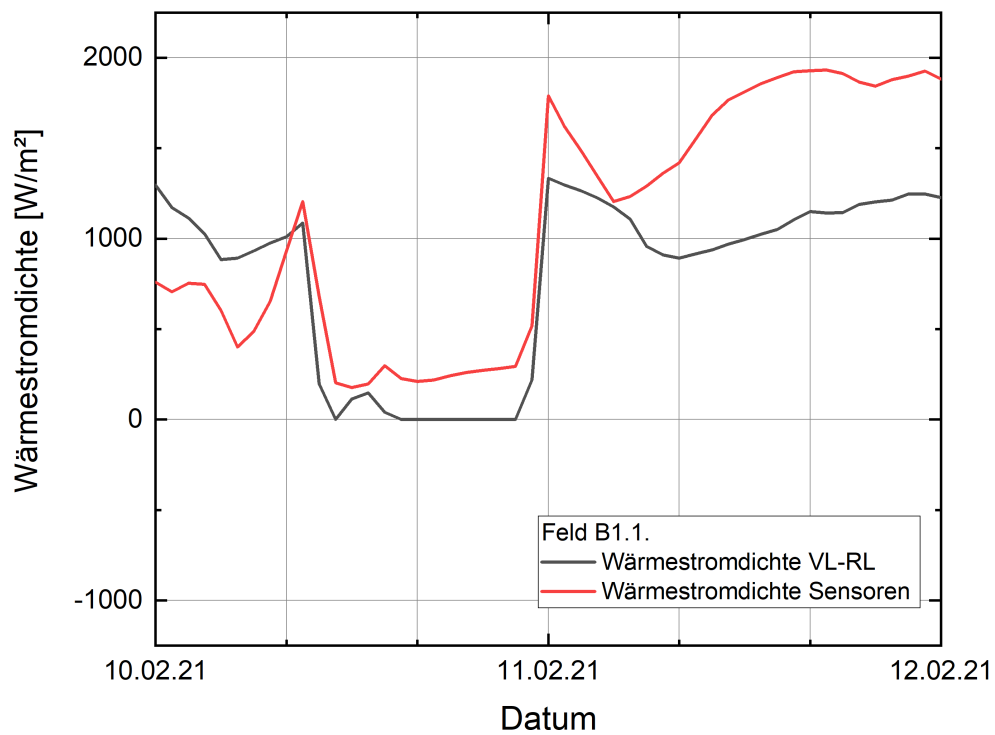


Abb. 2-140 Testfeld B1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

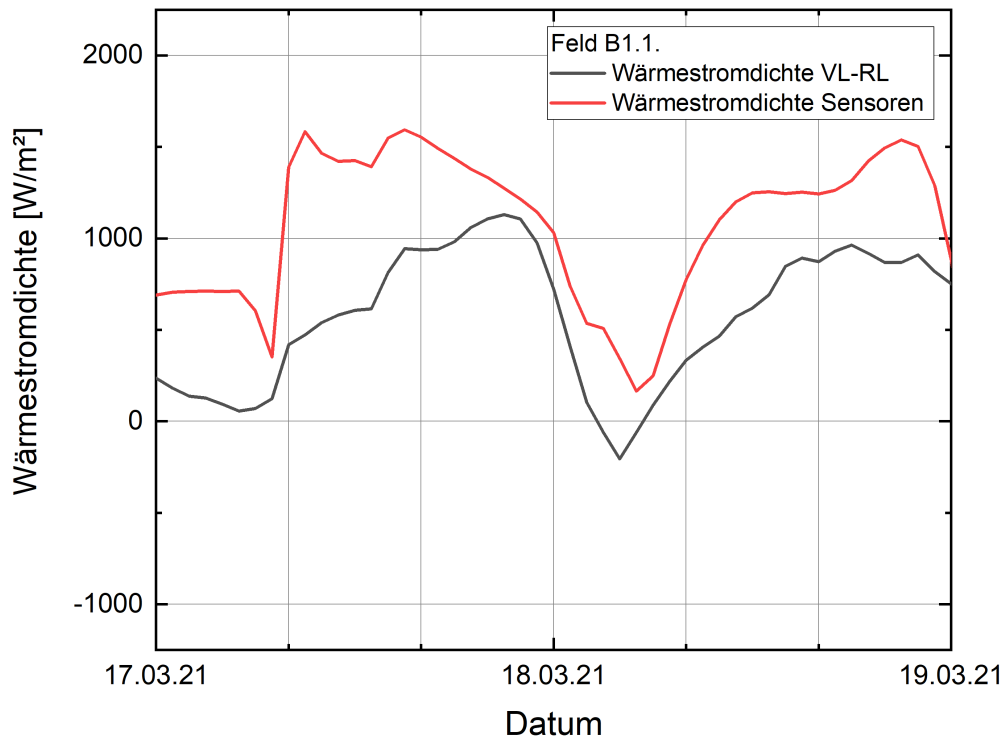


Abb. 2-141 Testfeld B1.1, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

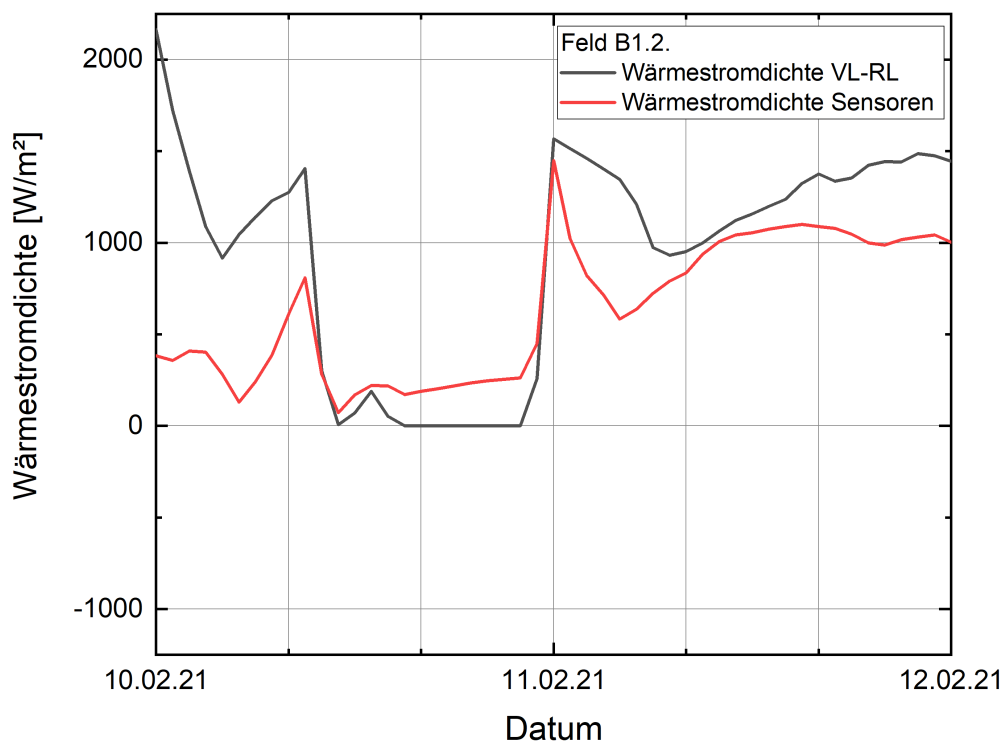


Abb. 2-142 Testfeld B1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren

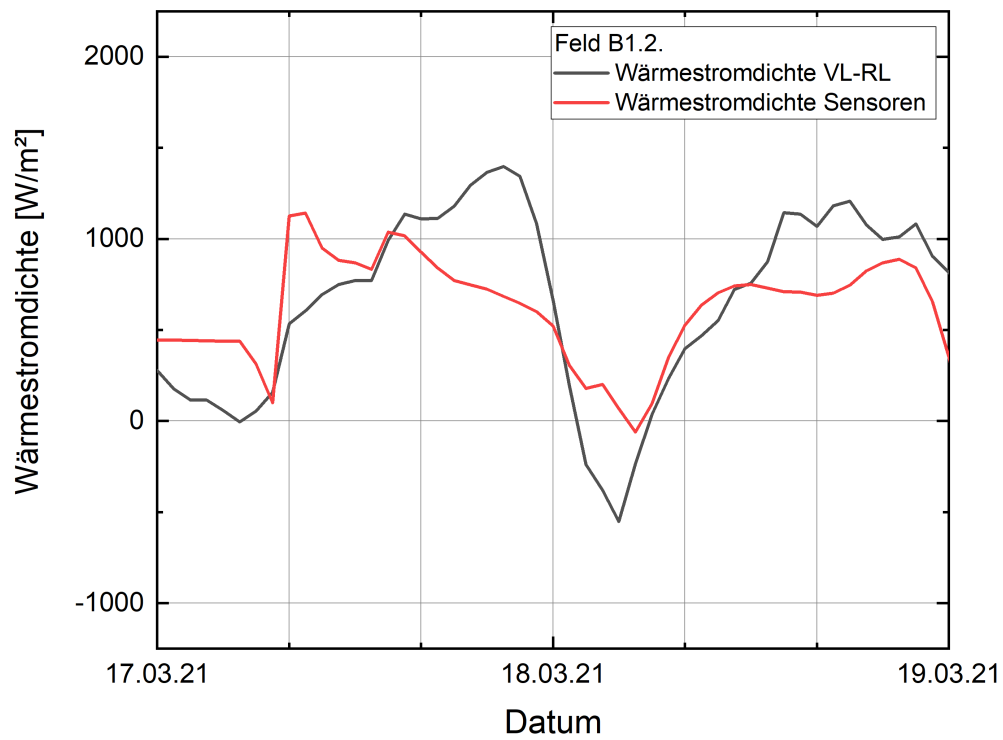


Abb. 2-143 Testfeld B1.2, Wärmestromdichte VL-RL, Wärmestromdichte Sensoren



## 2.7 Energiebilanz

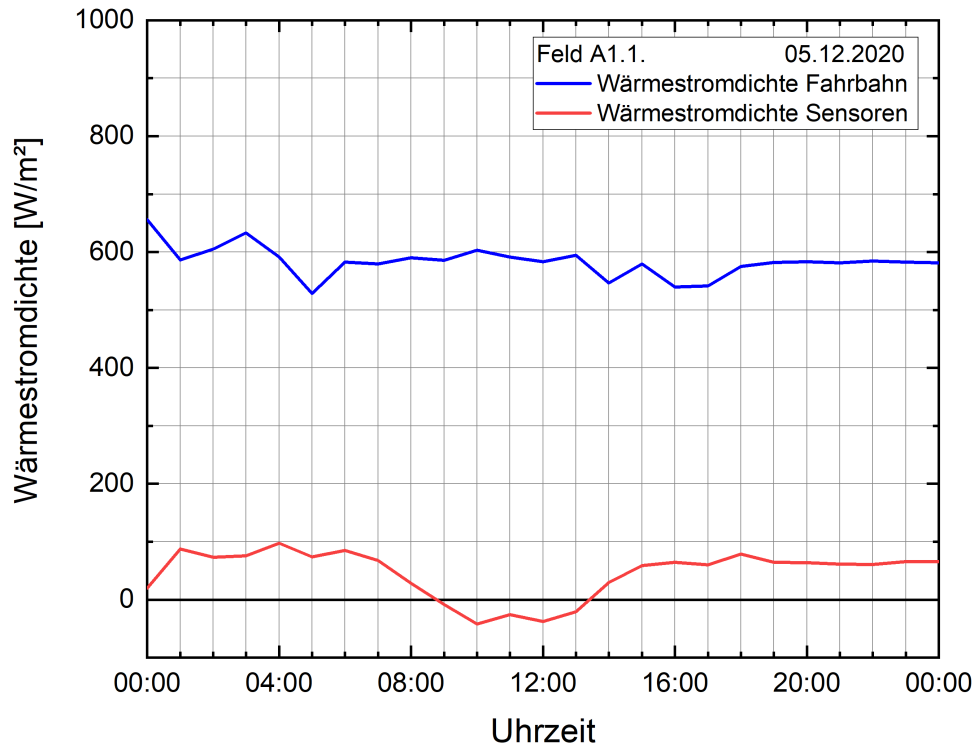


Abb. 2-144 Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

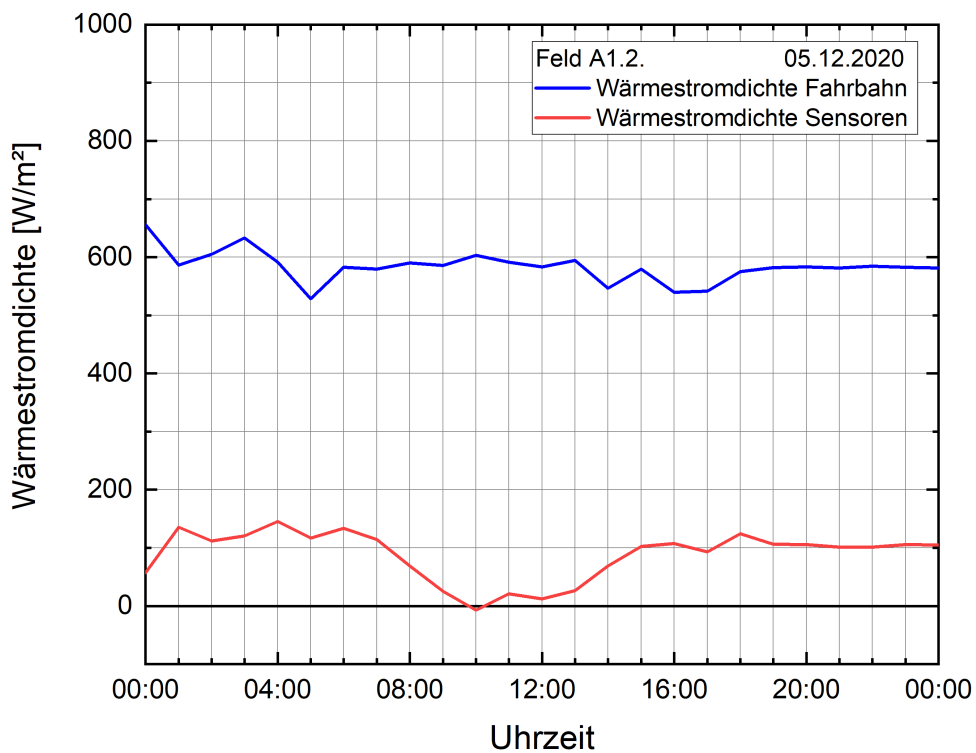


Abb. 2-145 Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

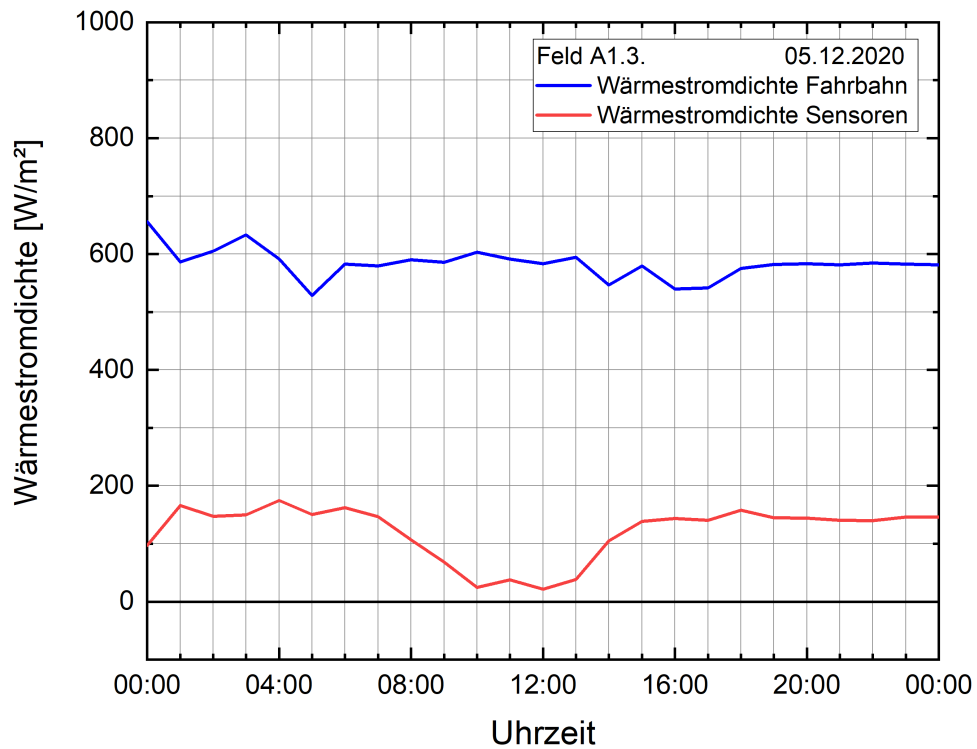


Abb. 2-146 Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

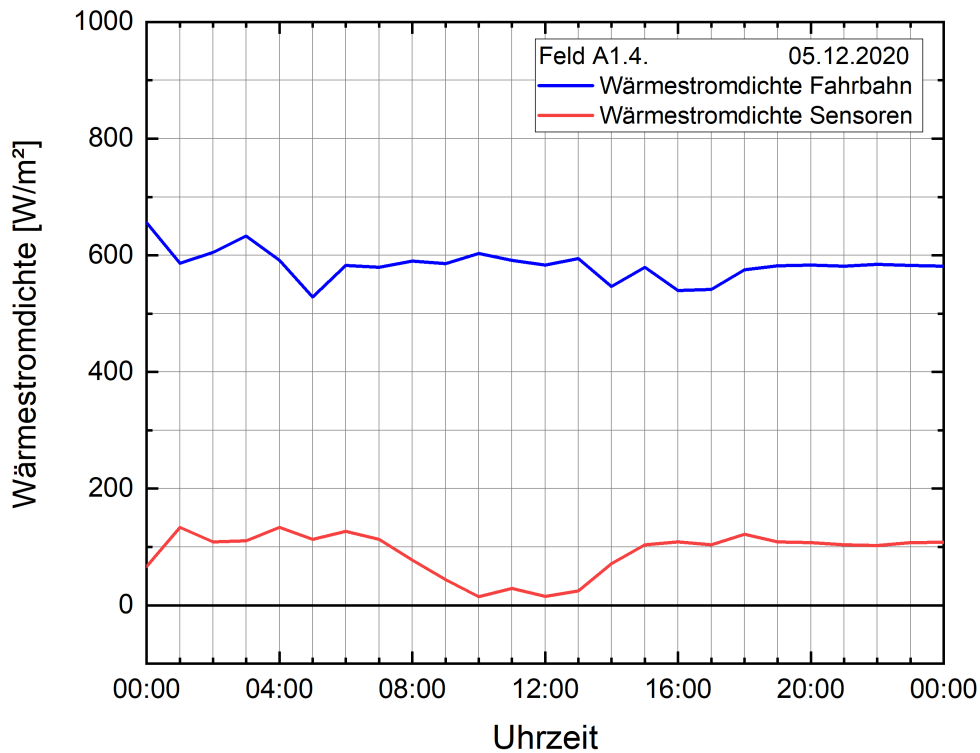


Abb. 2-147 Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

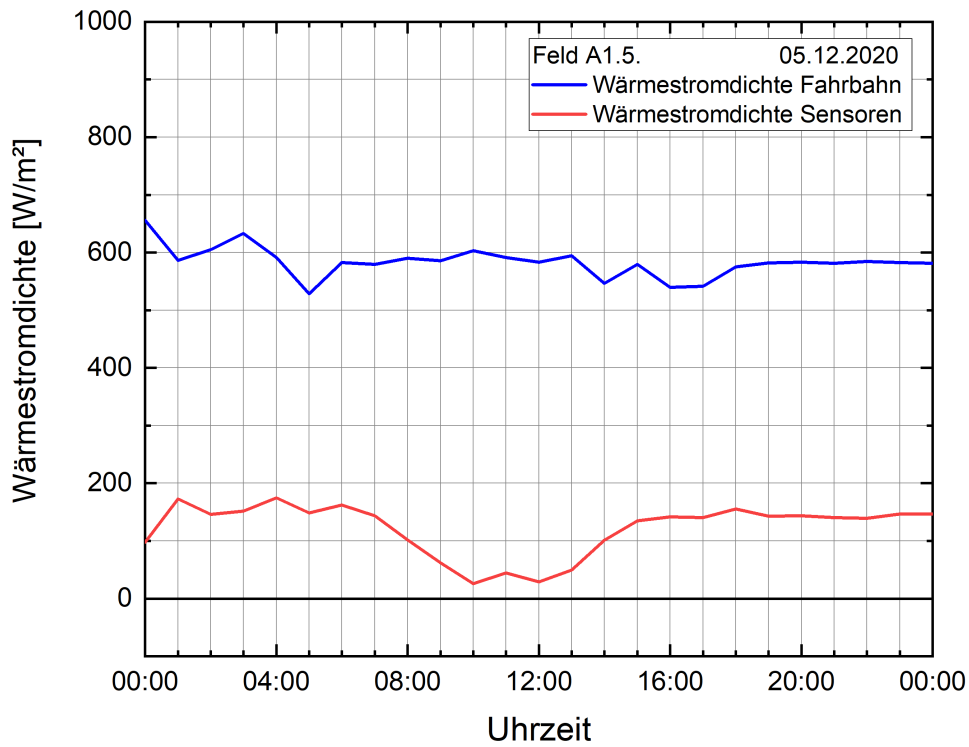


Abb. 2-148 Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

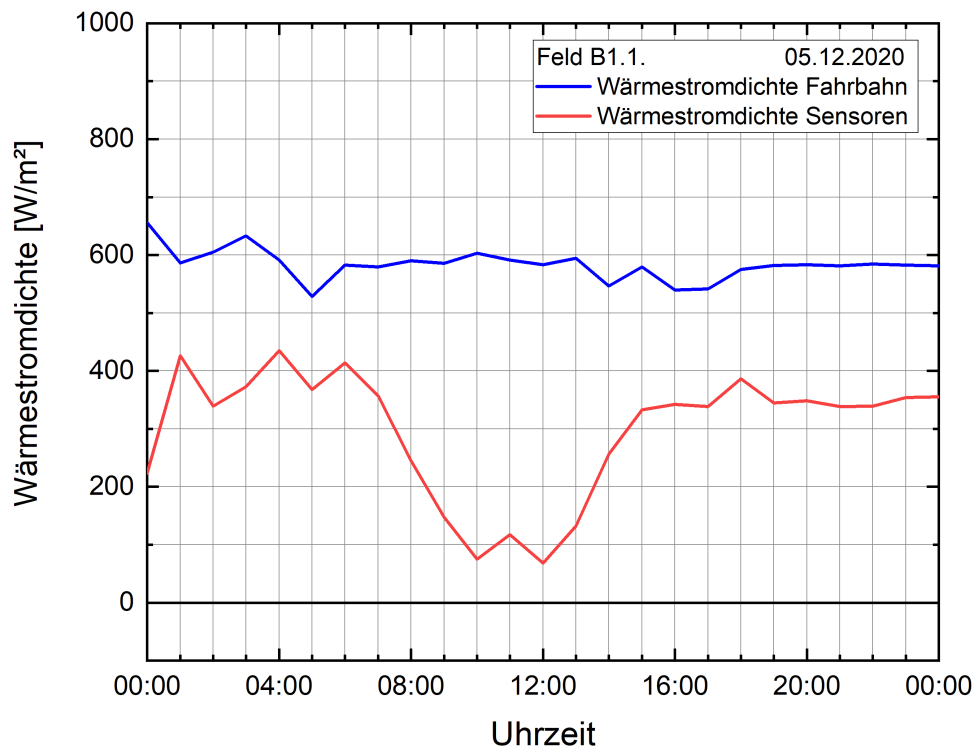


Abb. 2-149 Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

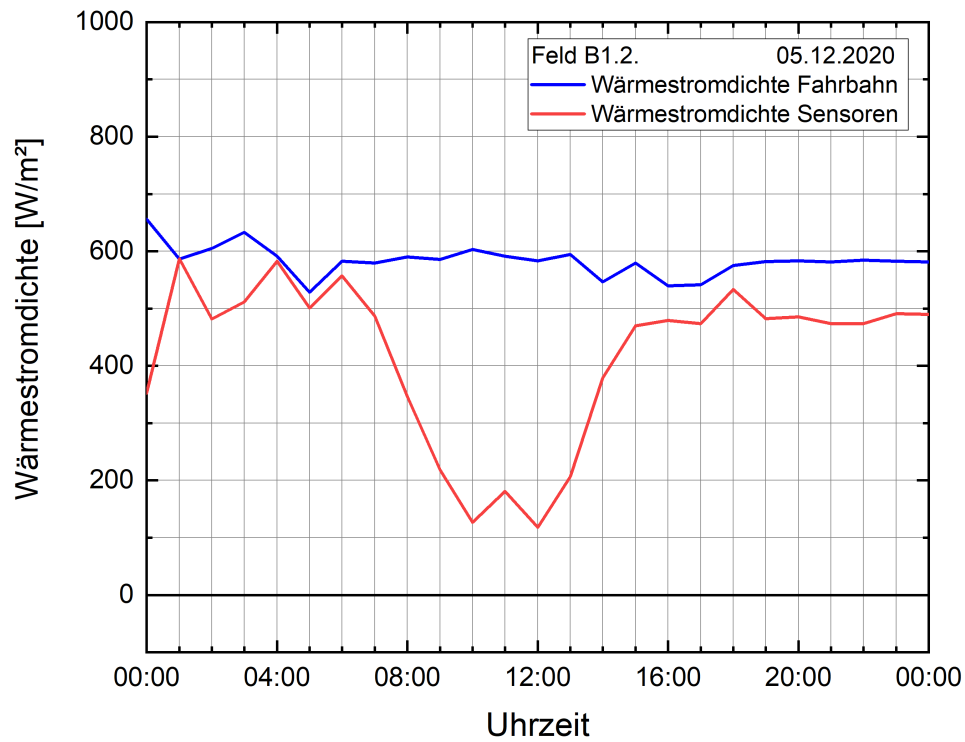


Abb. 2-150 Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

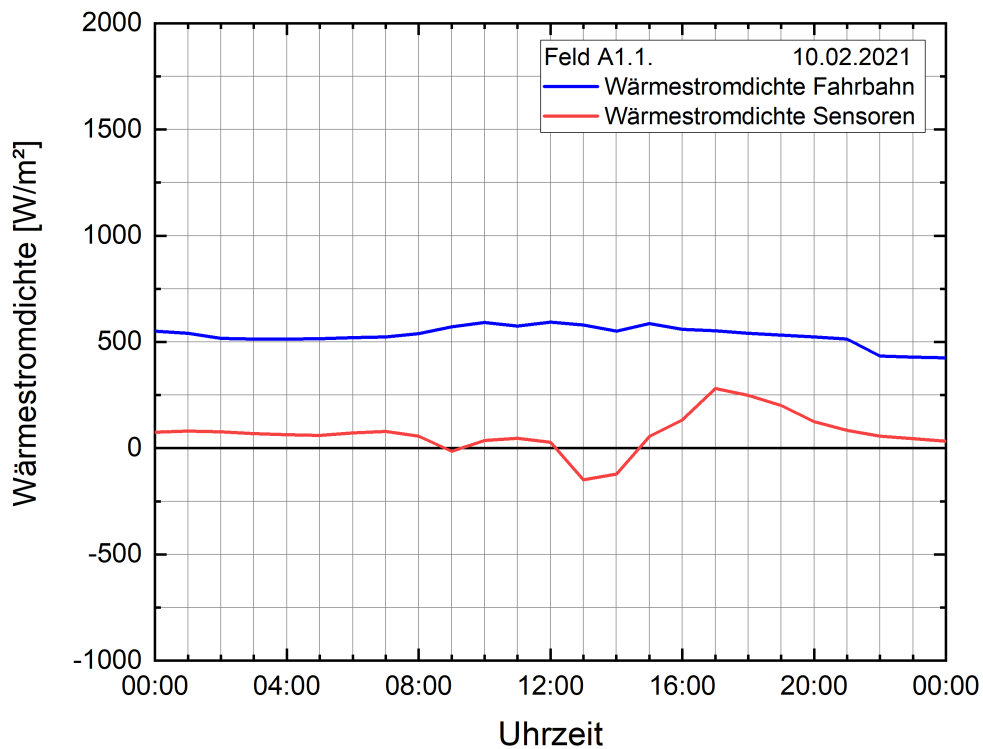


Abb. 2-151 Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren



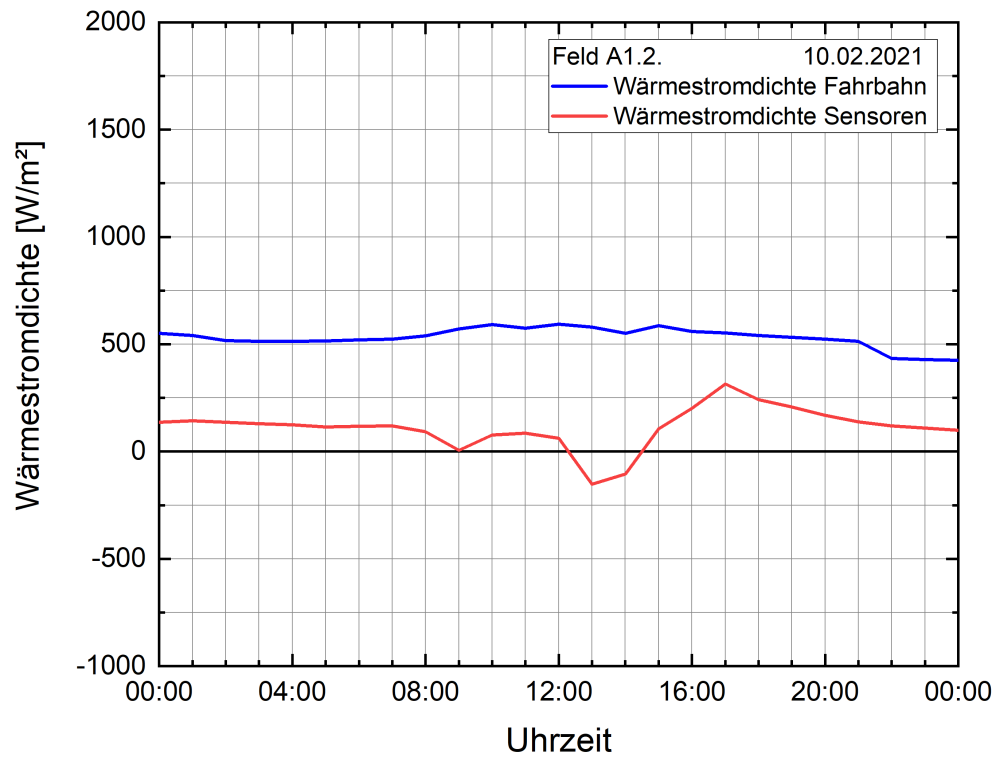


Abb. 2-152 Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

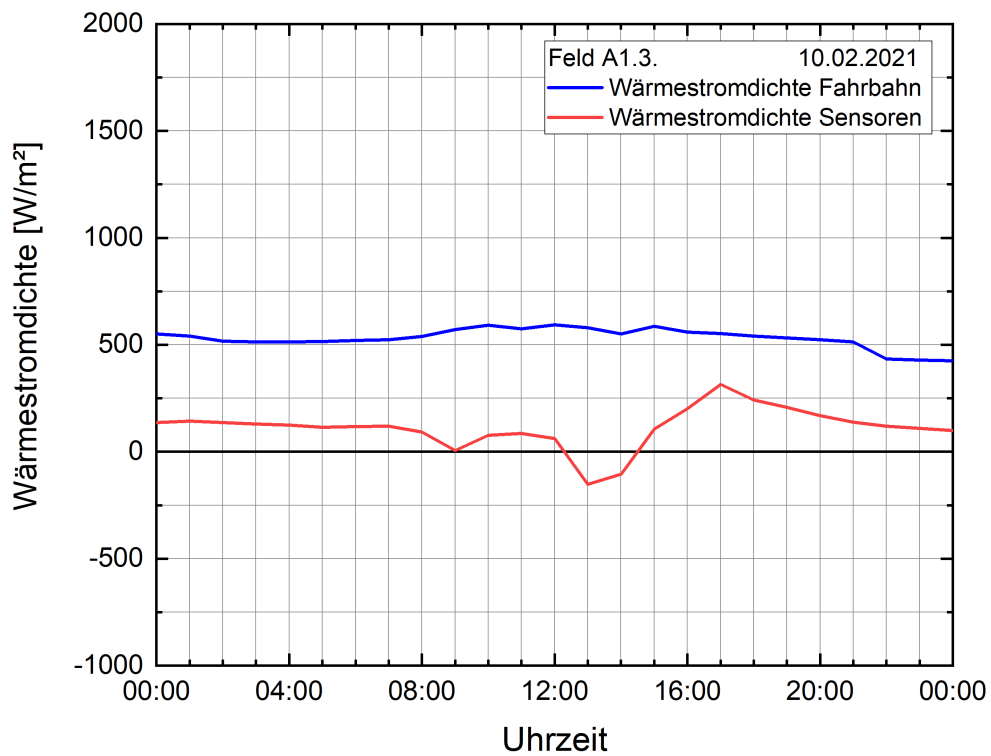


Abb. 2-153 Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

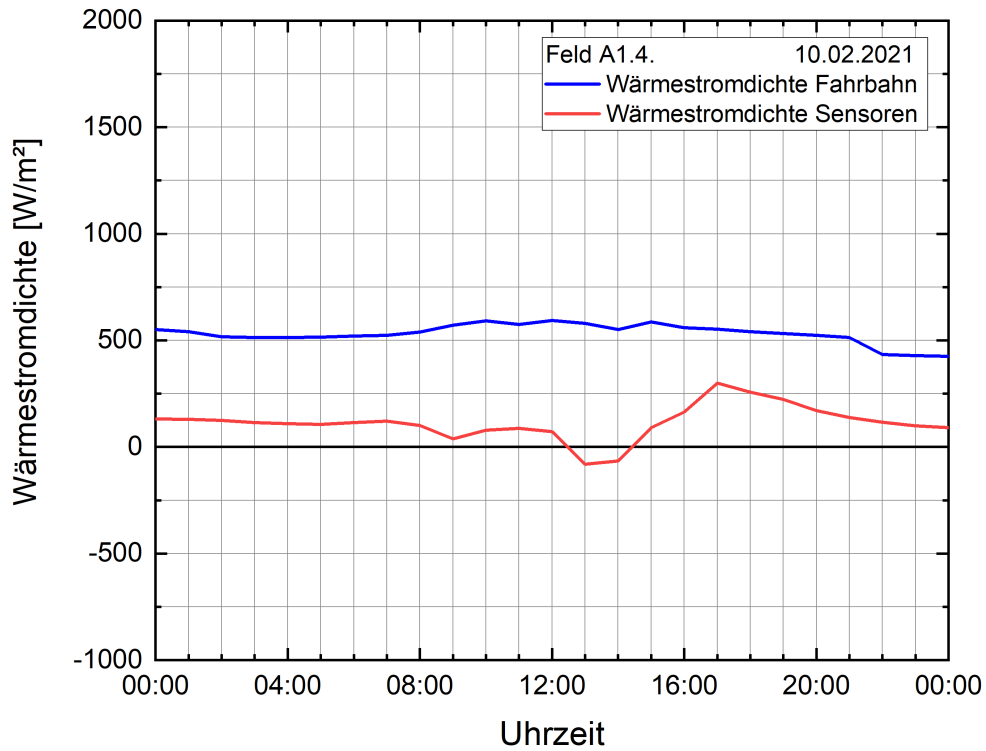


Abb. 2-154 Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

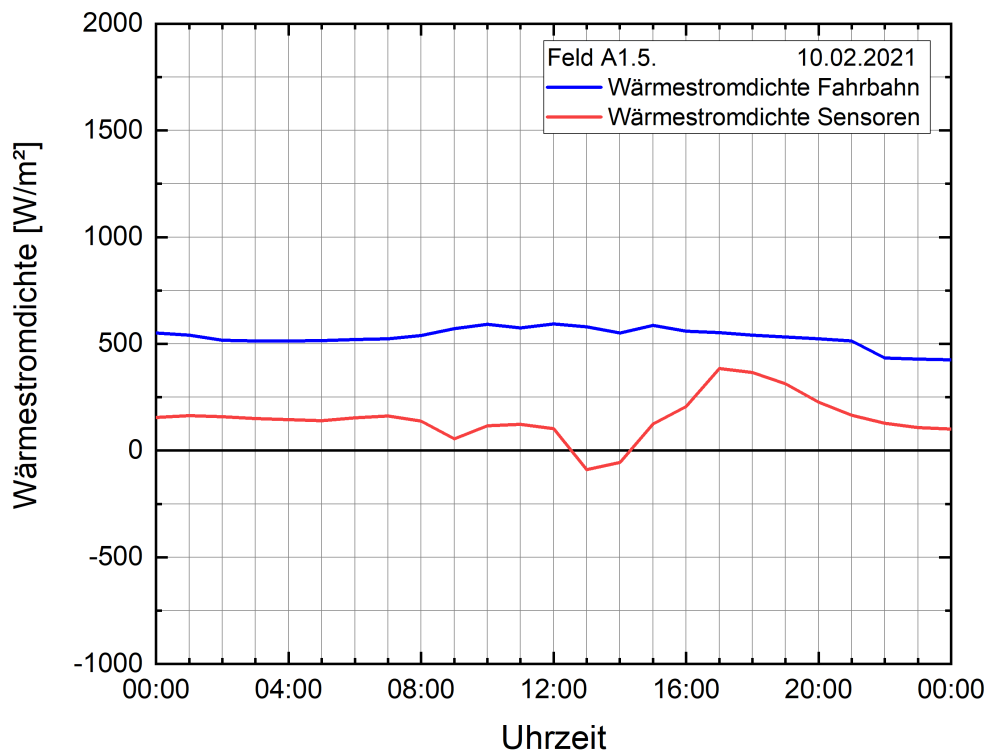


Abb. 2-155 Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

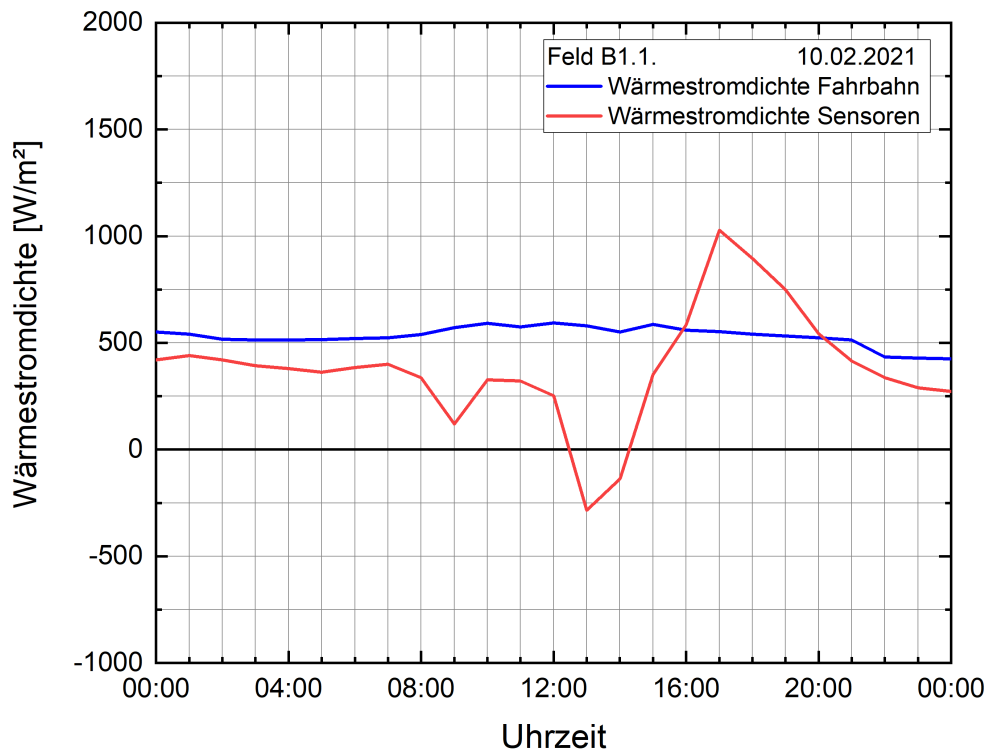


Abb. 2-156 Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

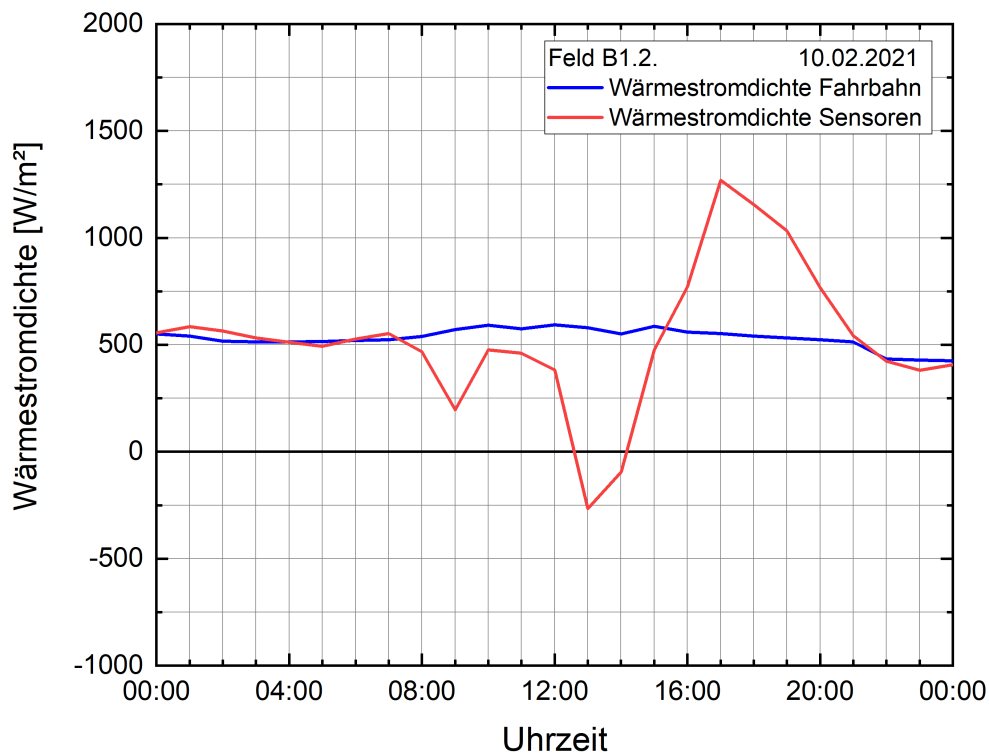


Abb. 2-157 Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

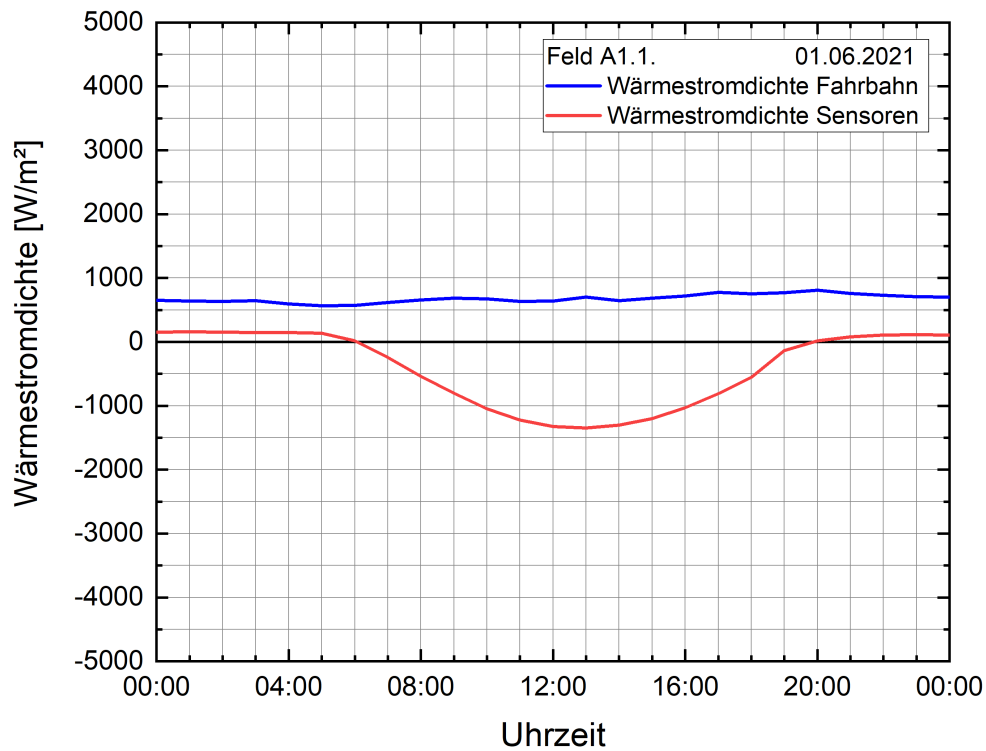


Abb. 2-158 Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

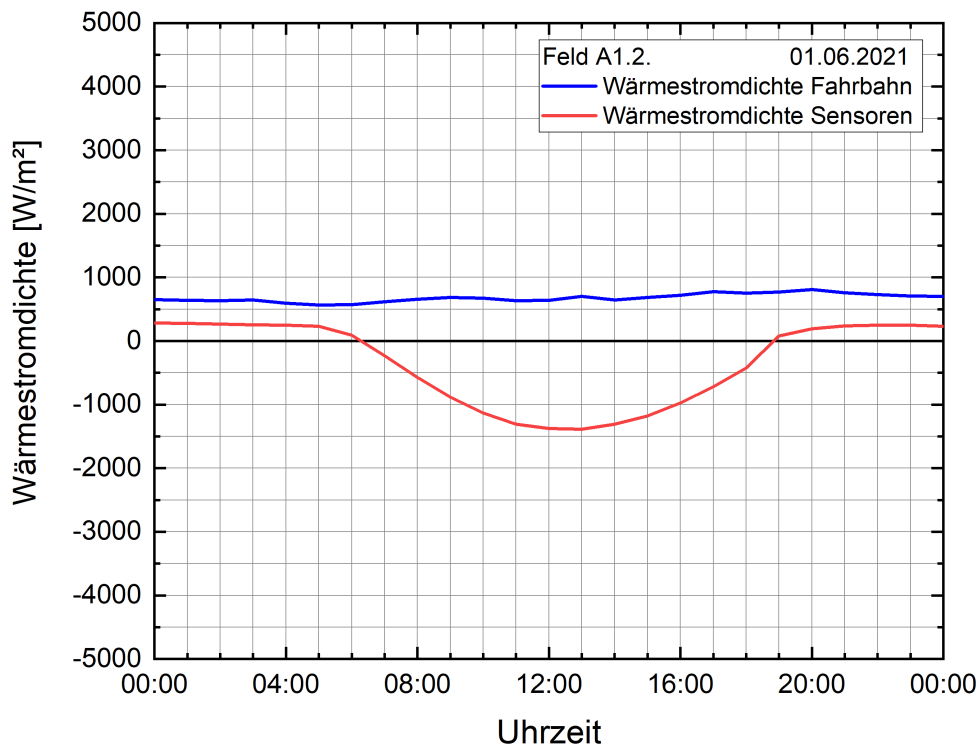


Abb. 2-159 Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

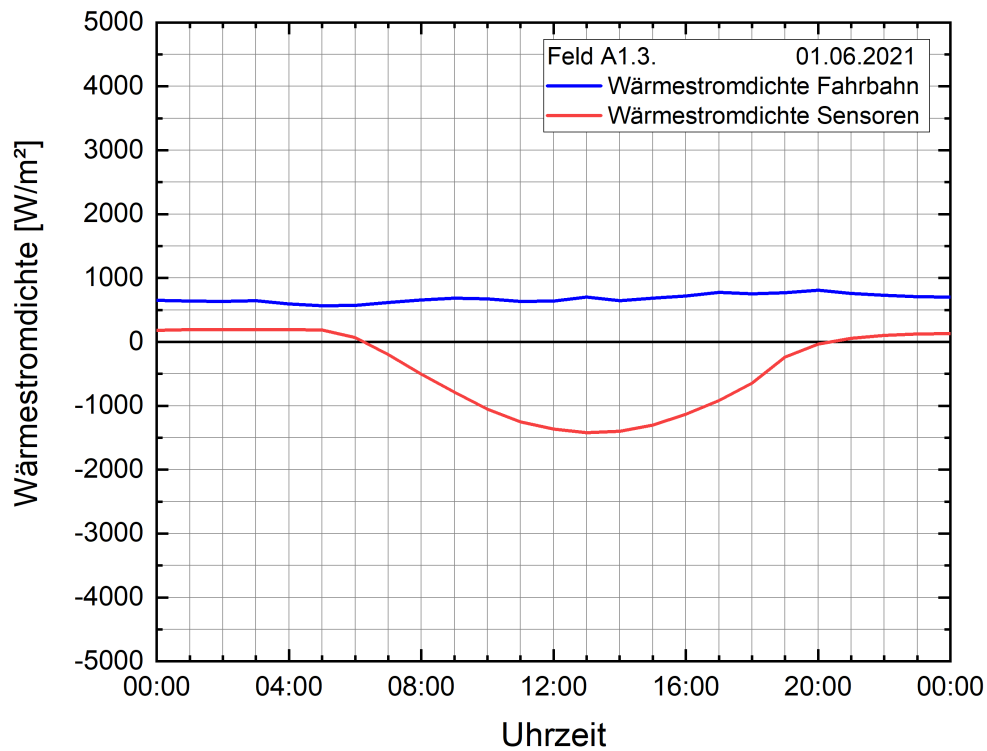


Abb. 2-160 Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

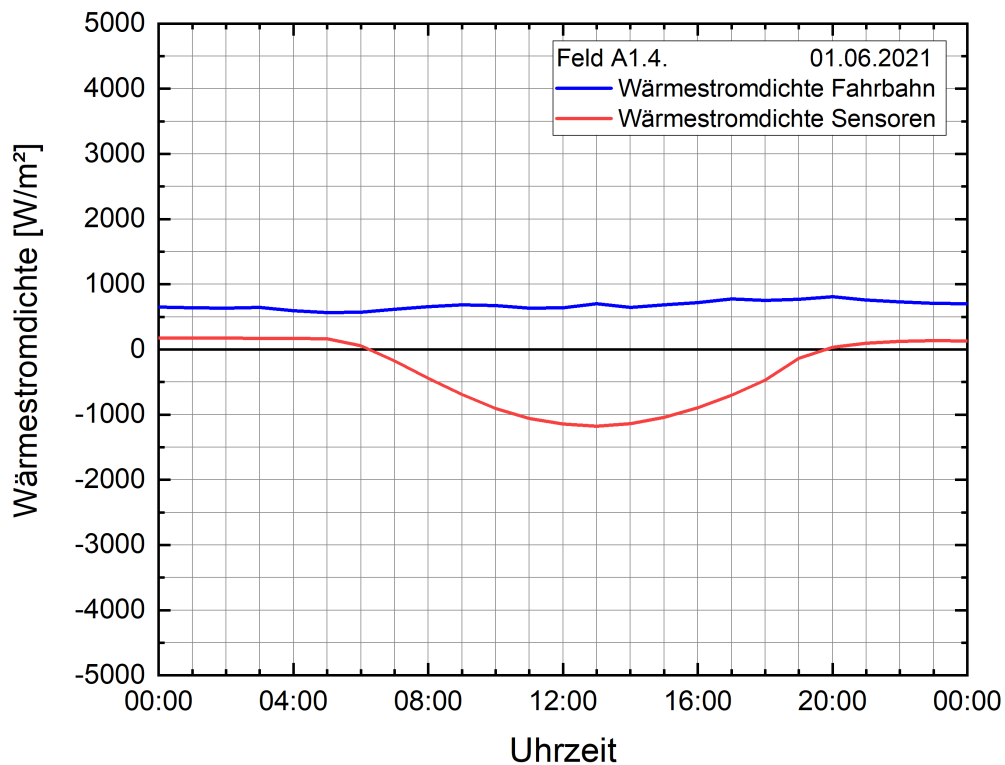


Abb. 2-161 Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

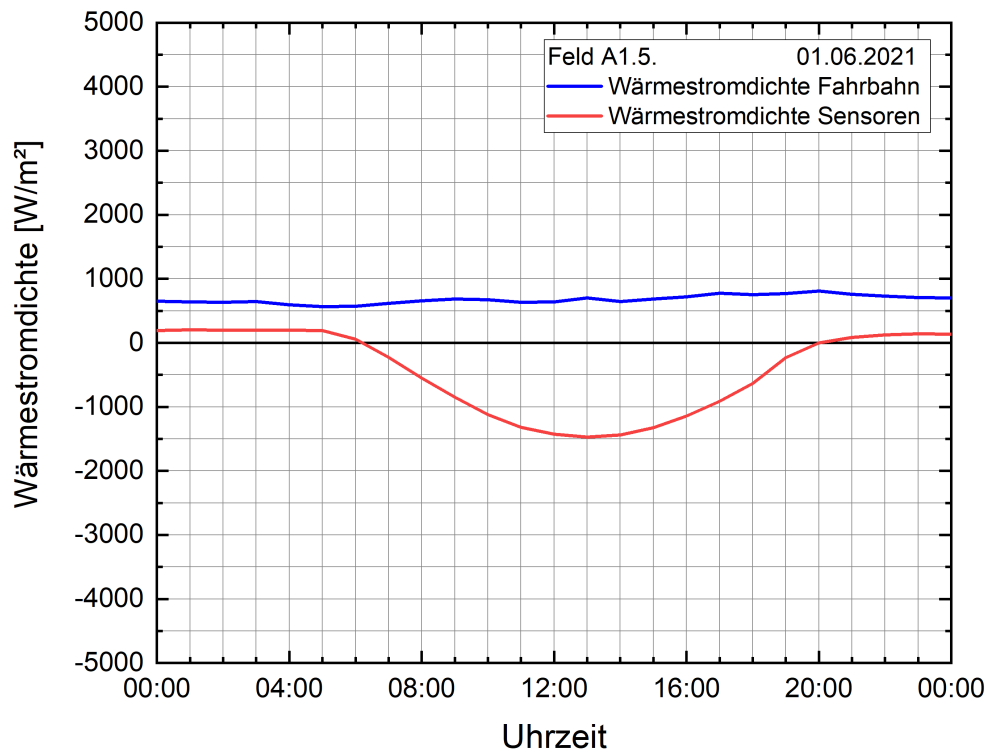


Abb. 2-162 Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

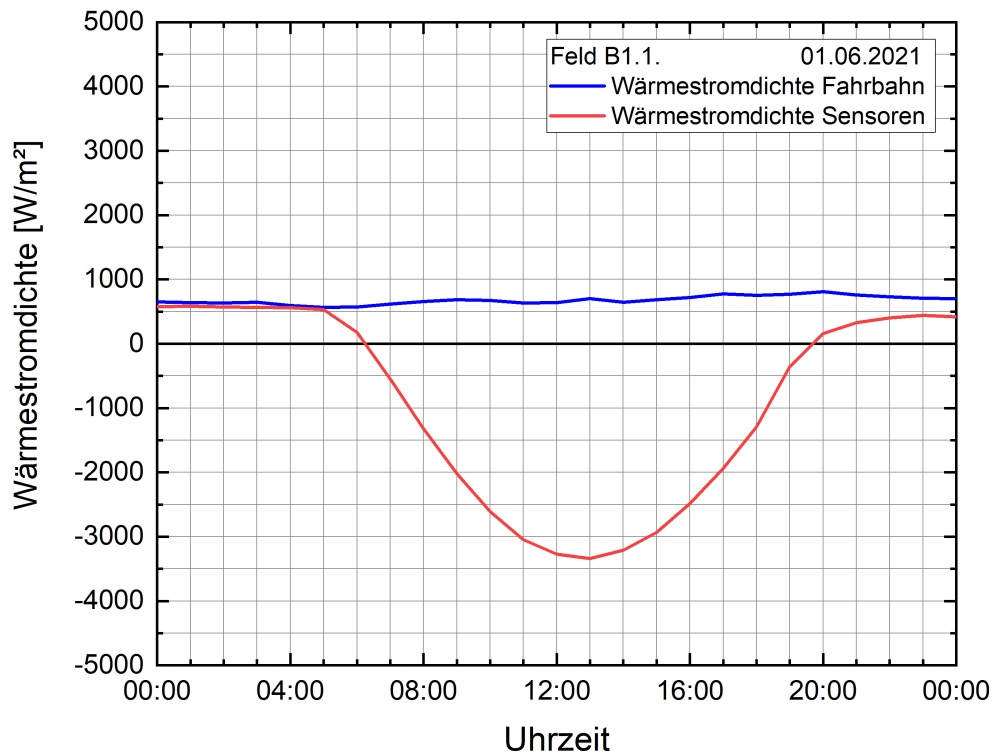


Abb. 2-163 Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

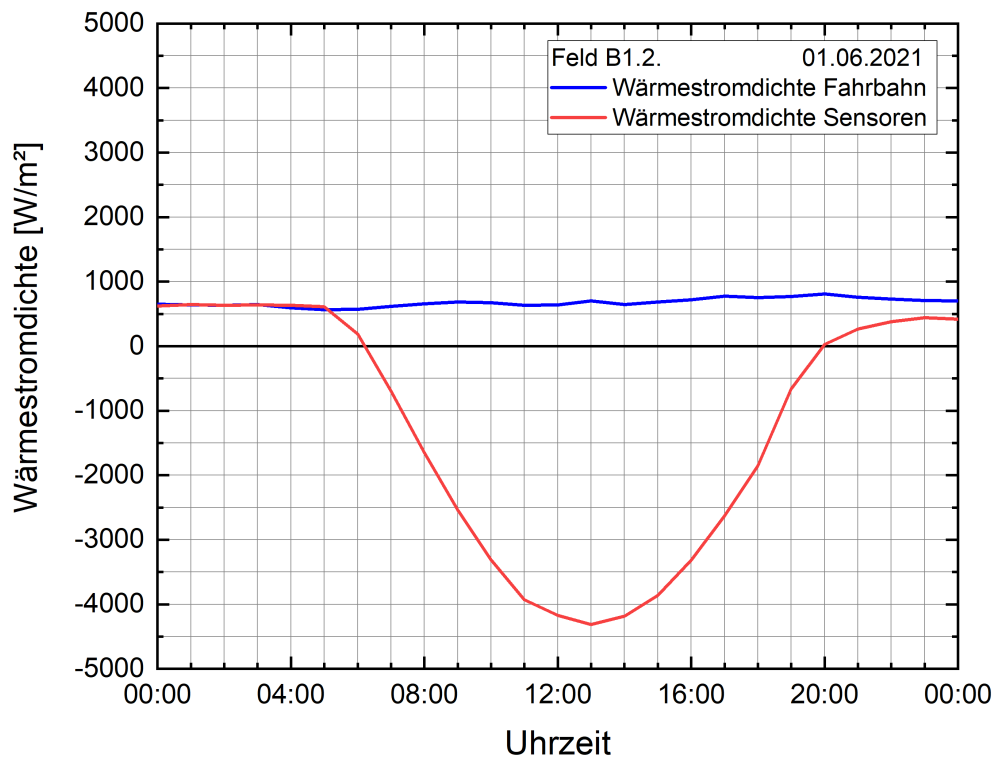


Abb. 2-164 Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

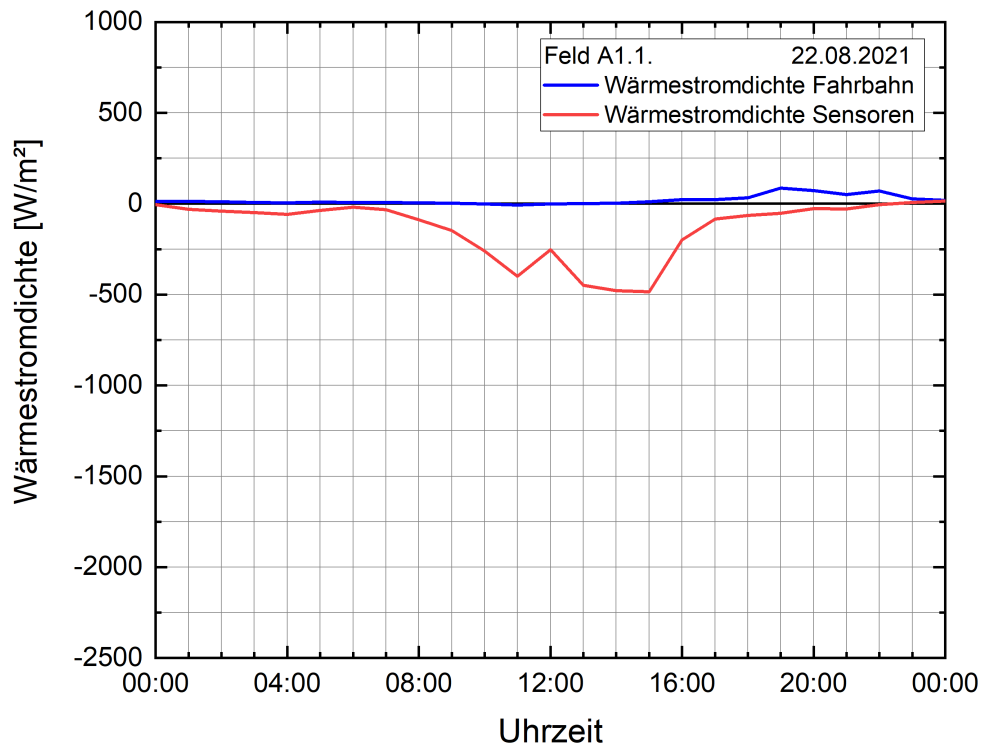


Abb. 2-165 Testfeld A1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

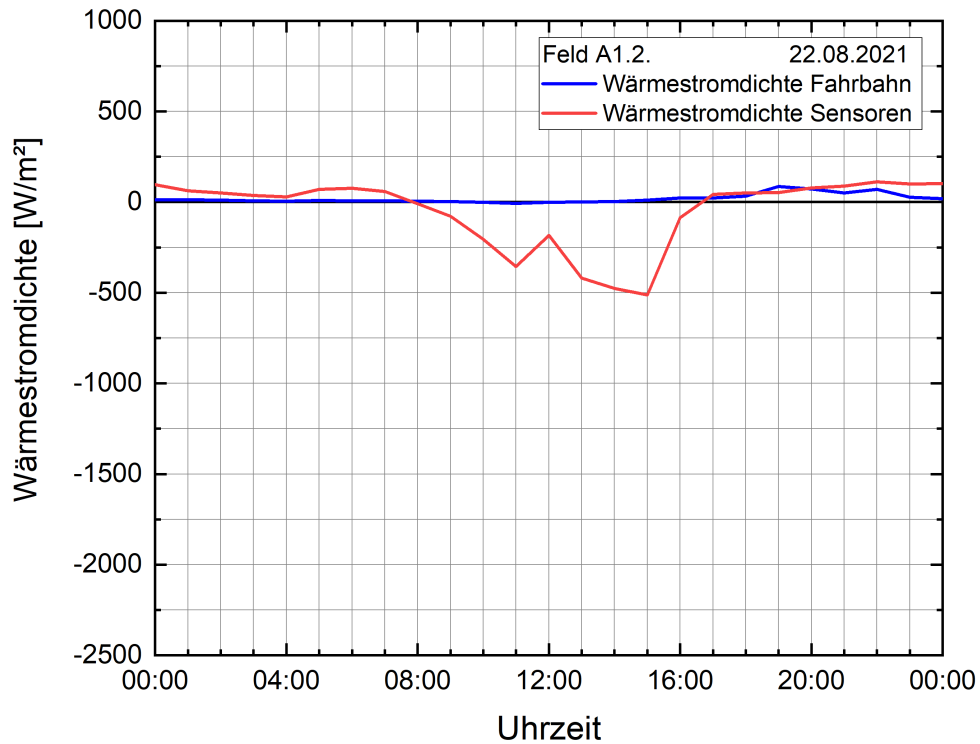


Abb. 2-166 Testfeld A1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

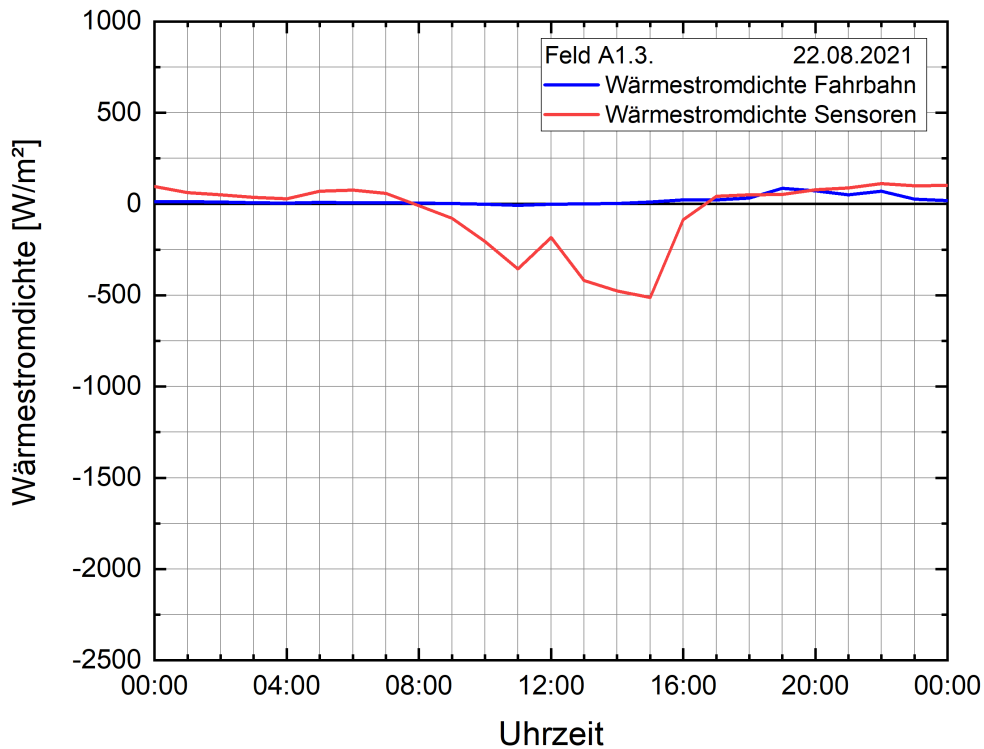


Abb. 2-167 Testfeld A1.3, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren



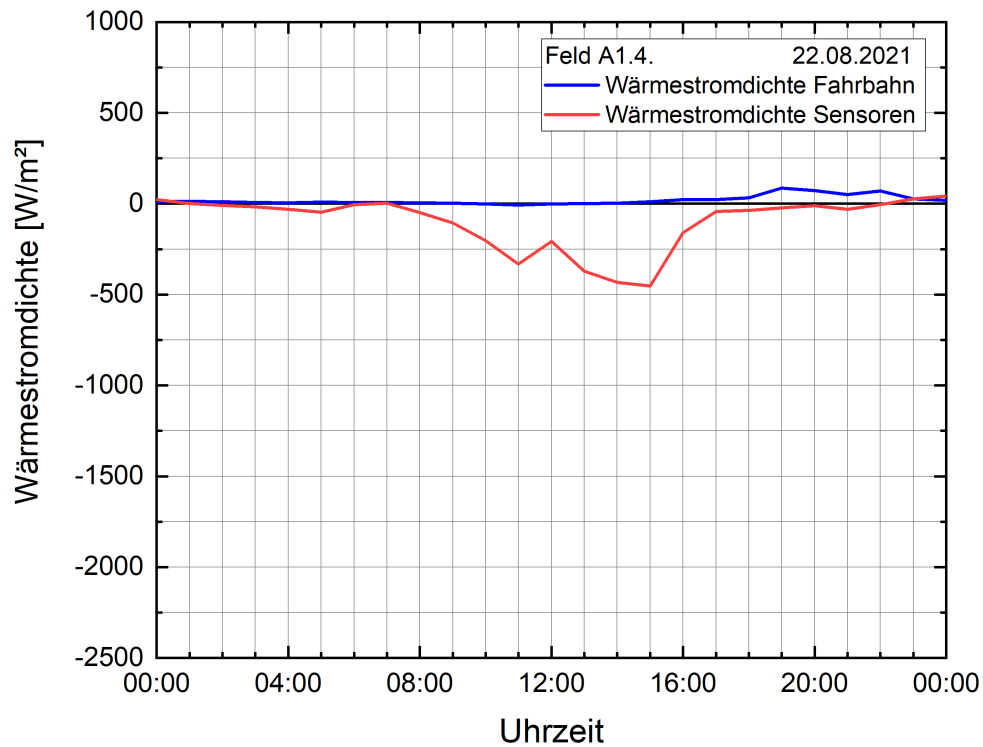


Abb. 2-168 Testfeld A1.4, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

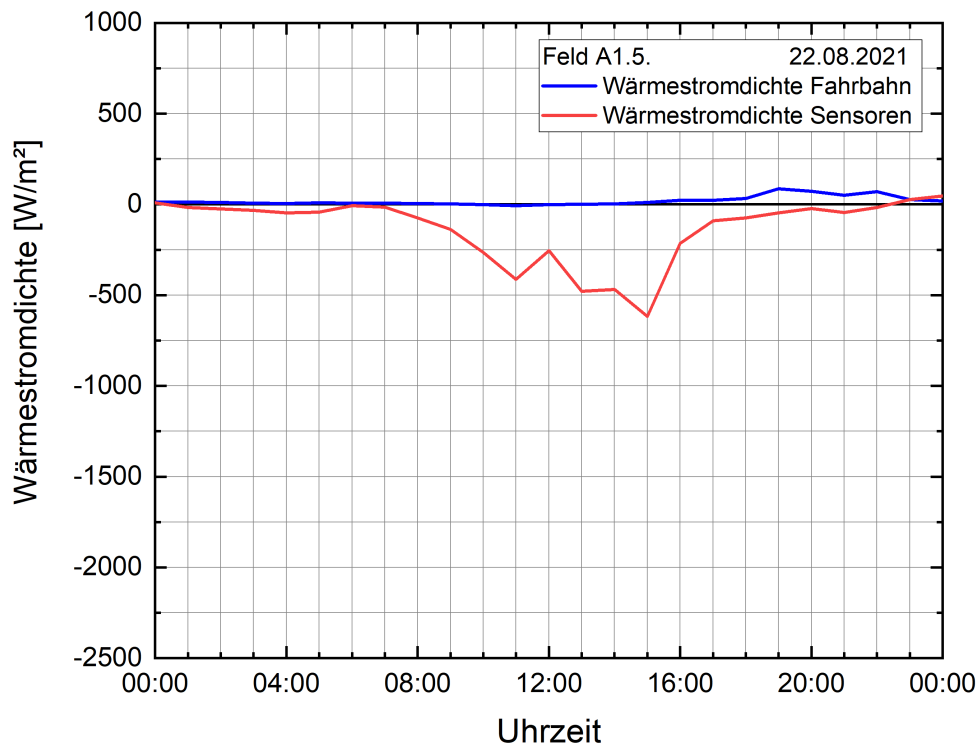


Abb. 2-169 Testfeld A1.5, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

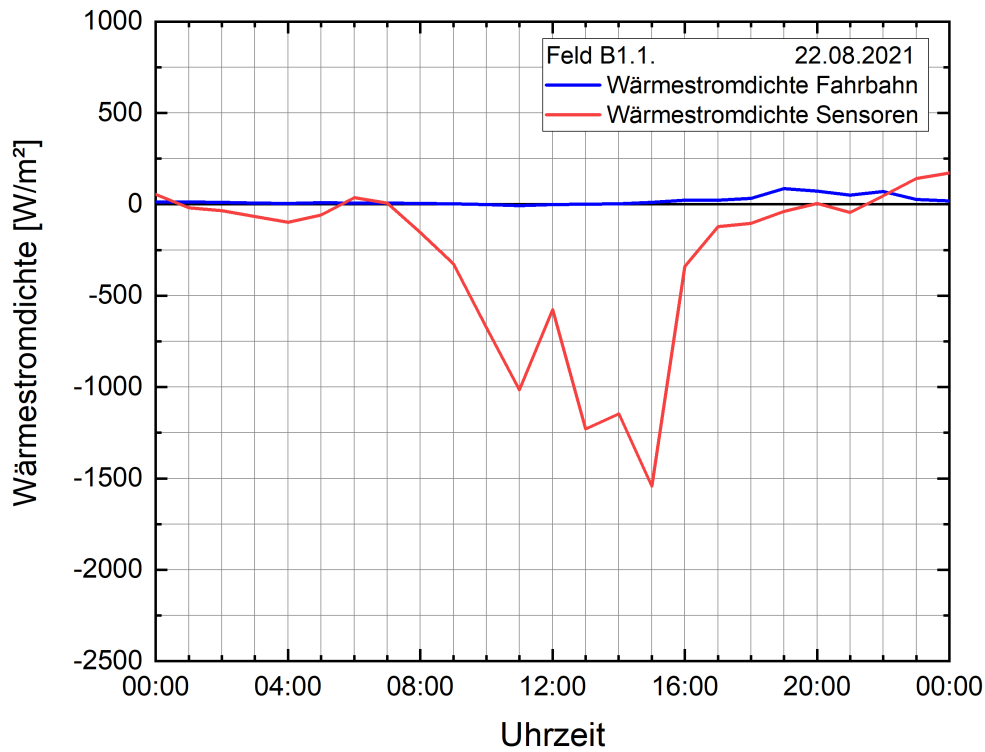


Abb. 2-170 Testfeld B1.1, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren

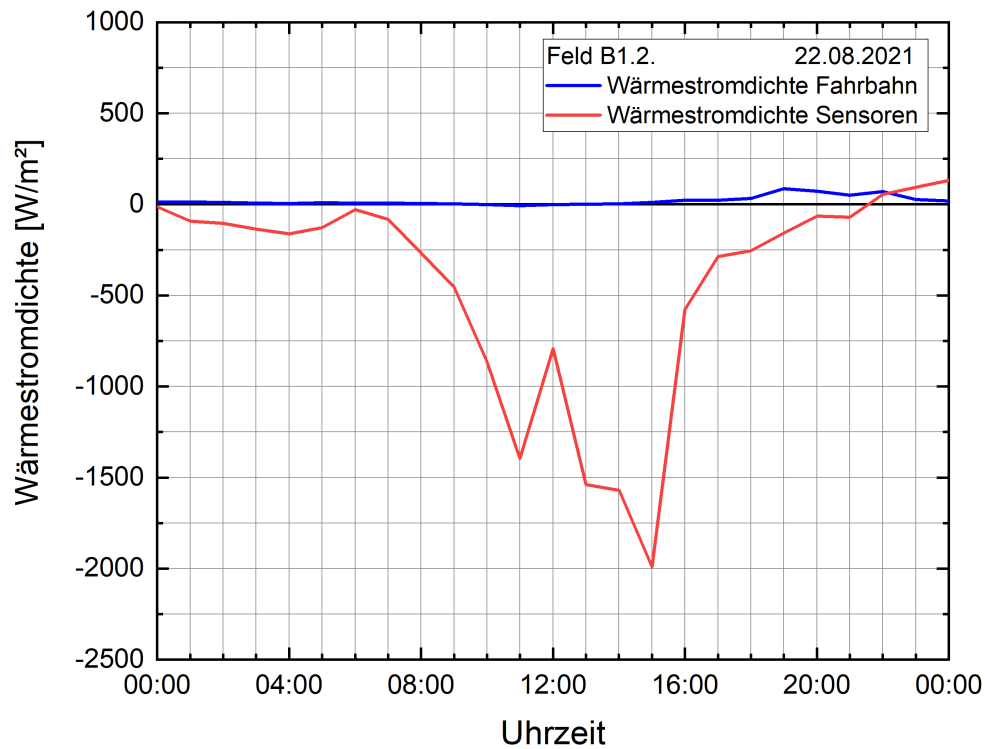


Abb. 2-171 Testfeld B1.2, Wärmestromdichte Fahrbahn, Wärmestromdichte Sensoren



Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann • Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik • Pfaffenwaldring 35 • 70569 Stuttgart

## Forschungsprogramm Straßenwesen

**FE 15.0656/2018/ERB**

### „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen“

Abschlussbericht zum 30.06.2022

Anhang II - Validierung

Auftraggeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53  
51427 Bergisch Gladbach

Forschungsnehmer:

Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik (IGS)  
Pfaffenwaldring 36  
70569 Stuttgart



**Institut für Geotechnik**

Boden- und Felsmechanik,  
Erd- und Grundbau,  
Fels- und Tunnelbau  
Spezialtiefbau,  
Umweltgeotechnik

**Direktor**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.  
Christian Moormann

**Kontakt**

Pfaffenwaldring 35  
70569 Stuttgart  
T 0711 685-62437  
F 0711 685-62439  
Christian.Moormann@  
igs.uni-stuttgart.de  
www.uni-stuttgart.de/igs/

**Aktenzeichen**

G65.1  
TK/MS  
30.06.2022

**Bank**

Baden-Württembergische Bank  
Stuttgart – BW-Bank

**IBAN**

DE51 6005 0101 7871 5216 87

**SWIFT/BIC**

SOLADEST600

**Umsatzsteuer-IdNr.**

DE147794196





## 1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Testfeld A1.1 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	5
Abb. 2-1	Testfeld A1.1 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	5
Abb. 2-1	Testfeld A1.1 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	6
Abb. 2-1	Testfeld A1.1 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	6
Abb. 2-1	Testfeld A1.1 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	7
Abb. 2-1	Testfeld A1.1 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	7
Abb. 2-1	Testfeld A1.2 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	8
Abb. 2-1	Testfeld A1.2 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	8
Abb. 2-1	Testfeld A1.2 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	9
Abb. 2-1	Testfeld A1.2 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	9
Abb. 2-1	Testfeld A1.2 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	10
Abb. 2-1	Testfeld A1.2 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	10
Abb. 2-1	Testfeld A1.3 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	11
Abb. 2-1	Testfeld A1.3 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	11
Abb. 2-1	Testfeld A1.3 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	12
Abb. 2-1	Testfeld A1.3 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	12
Abb. 2-1	Testfeld A1.3 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	13
Abb. 2-1	Testfeld A1.3 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	13
Abb. 2-1	Testfeld A1.4 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	14
Abb. 2-1	Testfeld A1.4 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	14
Abb. 2-1	Testfeld A1.4 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	15
Abb. 2-1	Testfeld A1.4 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	15
Abb. 2-1	Testfeld A1.4 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	16
Abb. 2-1	Testfeld A1.4 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	16
Abb. 2-1	Testfeld A1.5 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	17
Abb. 2-1	Testfeld A1.5 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	17
Abb. 2-1	Testfeld A1.5 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	18
Abb. 2-1	Testfeld A1.5 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	18



---

Abb. 2-1	Testfeld A1.5 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	19
Abb. 2-1	Testfeld A1.5 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	19
Abb. 2-1	Testfeld B1.1 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	20
Abb. 2-1	Testfeld B1.1 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	20
Abb. 2-1	Testfeld B1.1 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	21
Abb. 2-1	Testfeld B1.1 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	21
Abb. 2-1	Testfeld B1.1 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	22
Abb. 2-1	Testfeld B1.1 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	22
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung	23
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	23
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung	24
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung	24
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung	25
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung	25
Abb. 2-1	Testfeld B1.2 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung	26



## 2 Einleitung

Die Validierung des numerischen Modells erfolgt anhand der drei definierten Testszenarien (laminare, turbulente und hochturbulente Durchströmung) im Winter 2020/2021. In den nachfolgenden Kapiteln wird die Validierung für jedes Szenario jedes Testfeldes einzeln dargestellt. Wie bereits im Bericht beschrieben wurden zwei Varianten des Aufbringens der Randbedingungen untersucht. Einerseits das „Temperaturmodell“, welches die auf die Freifläche wirkenden Temperaturen als Randbedingungen verwendet (Dirichlet-Randbedingung), andererseits das „Wärmestrommodell“ welches die einwirkenden Wärmeströme als Randbedingung annimmt (Neumann-Randbedingungen). Es zeigt sich, dass das „Temperaturmodell“ mit den gemessenen Werten in allen Strömungszuständen und bei allen Testfeldern mit den gemessenen Werten eher übereinstimmen, als das „Wärmestrommodell“. Das „Temperaturmodell“ wurde daher als Grundlage zur Durchführung der Parameterstudie verwendet.



### 3 Laminare Durchströmung

#### 3.1 Testfeld A1.1

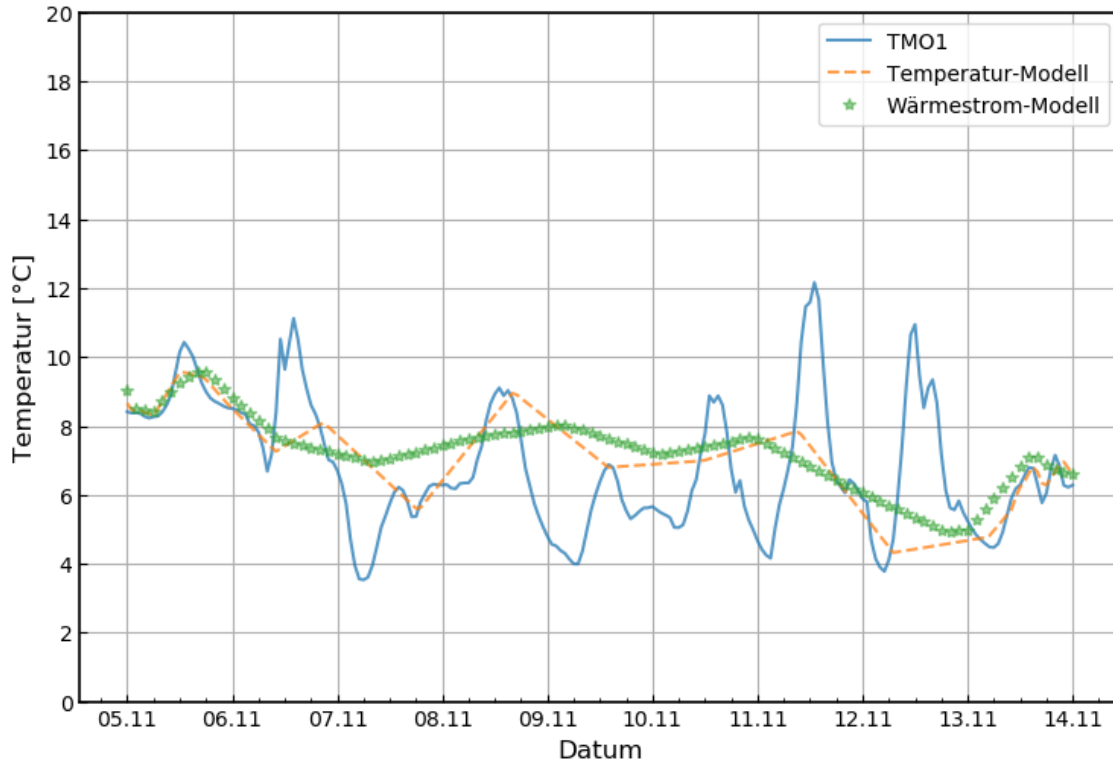


Abb. 3-1 Testfeld A1.1 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

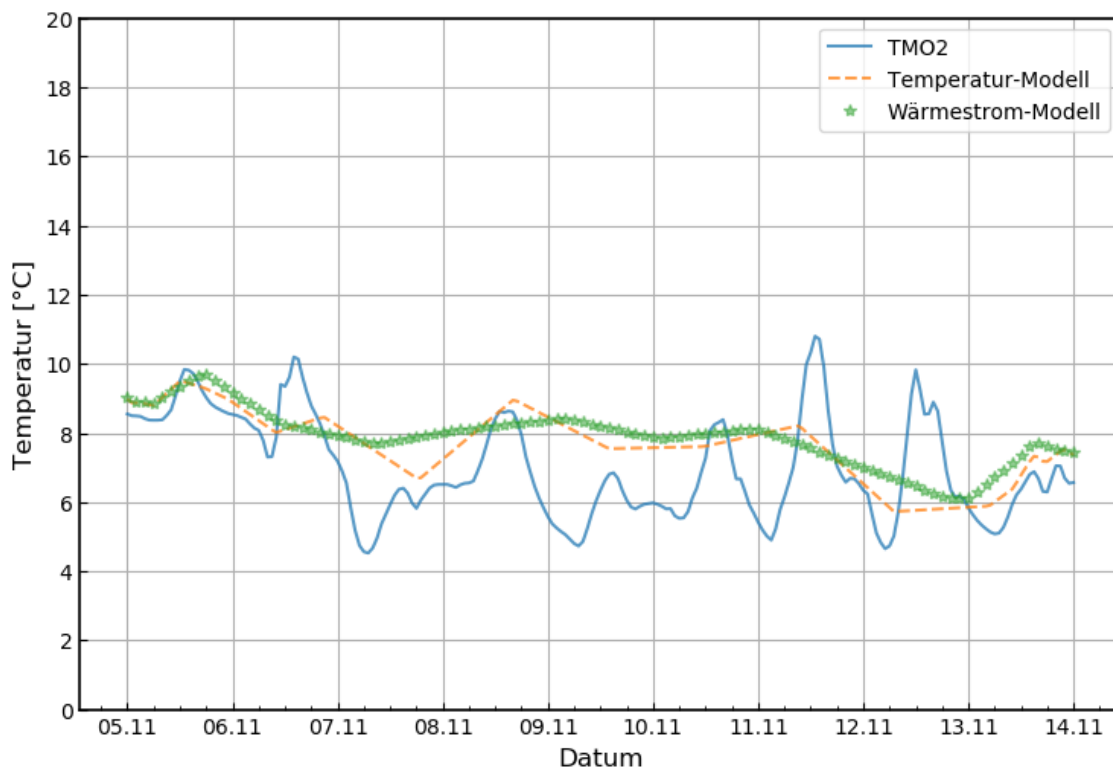


Abb. 3-2 Testfeld A1.1 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung

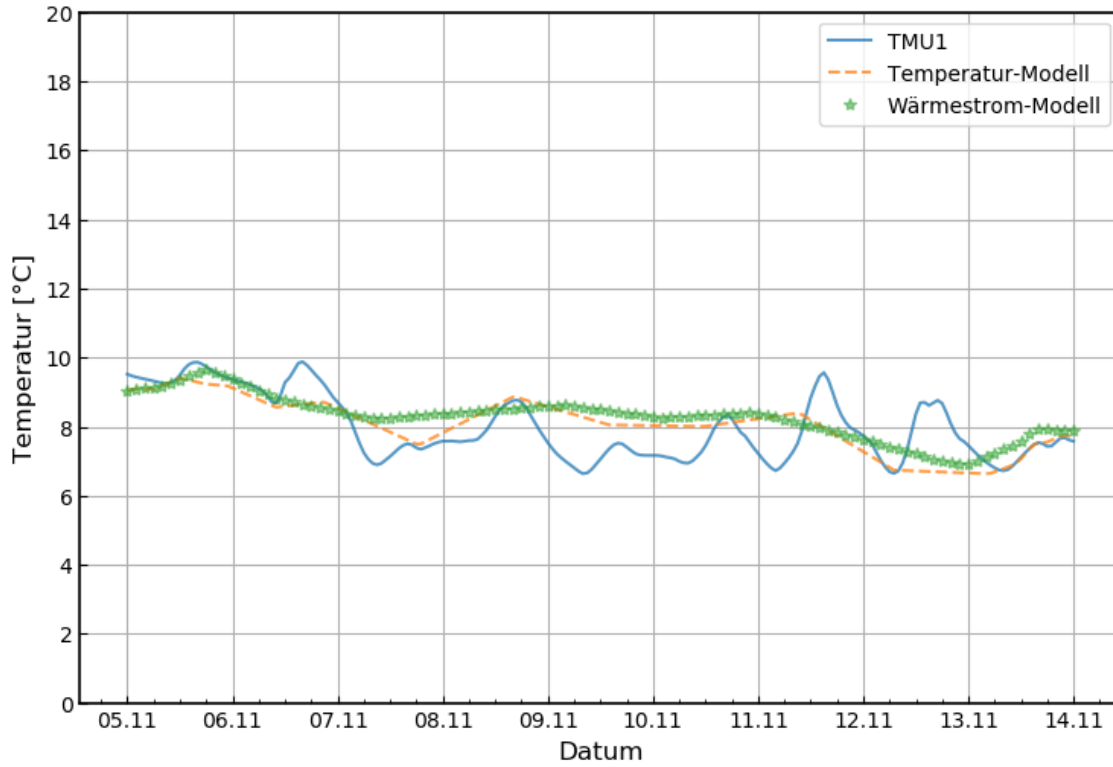


Abb. 3-3 Testfeld A1.1 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

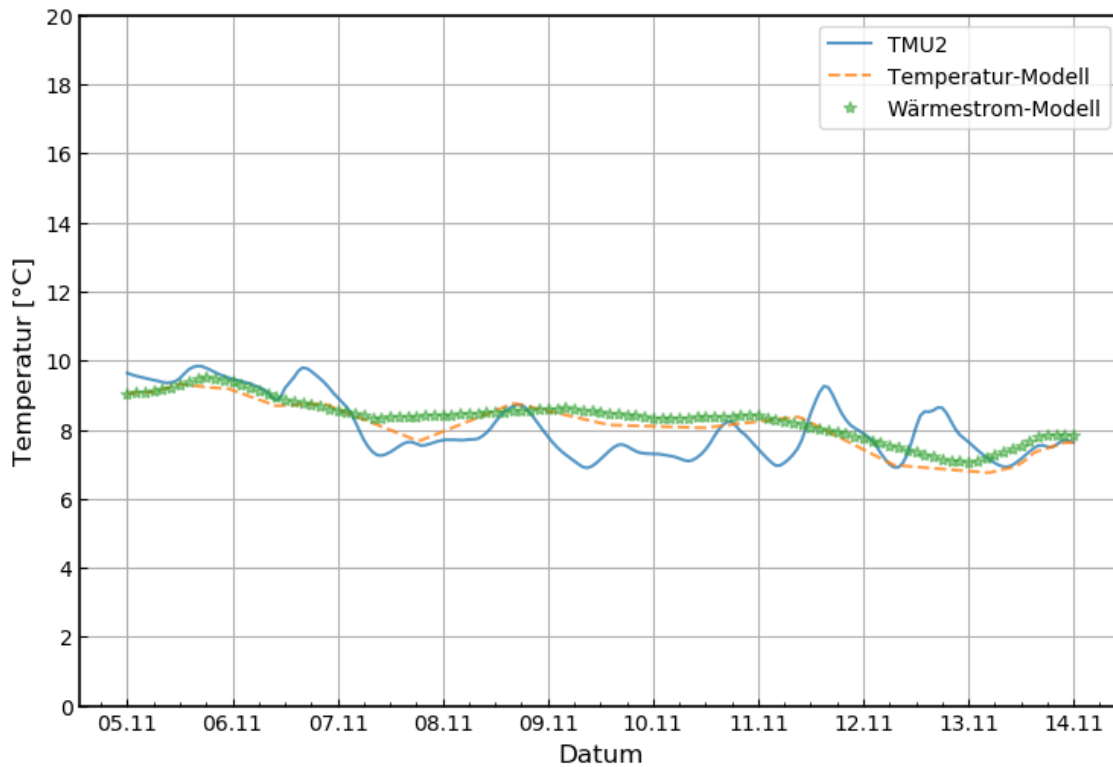


Abb. 3-4 Testfeld A1.1 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung



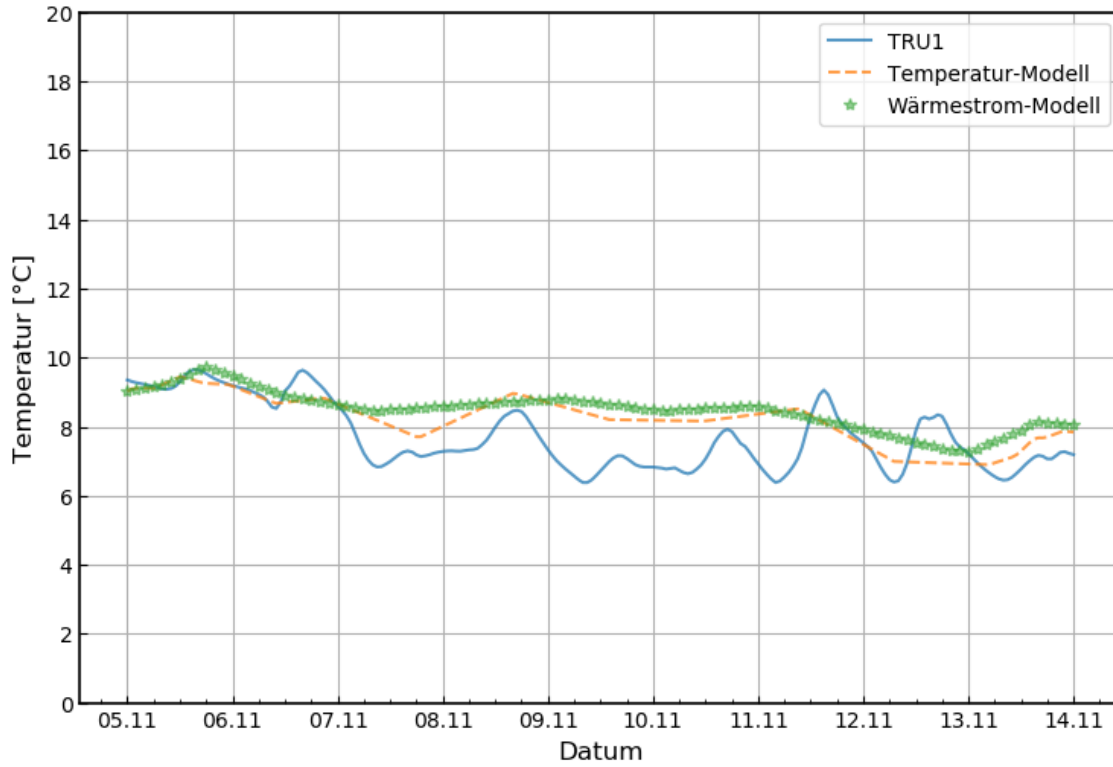


Abb. 3-5 Testfeld A1.1 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung

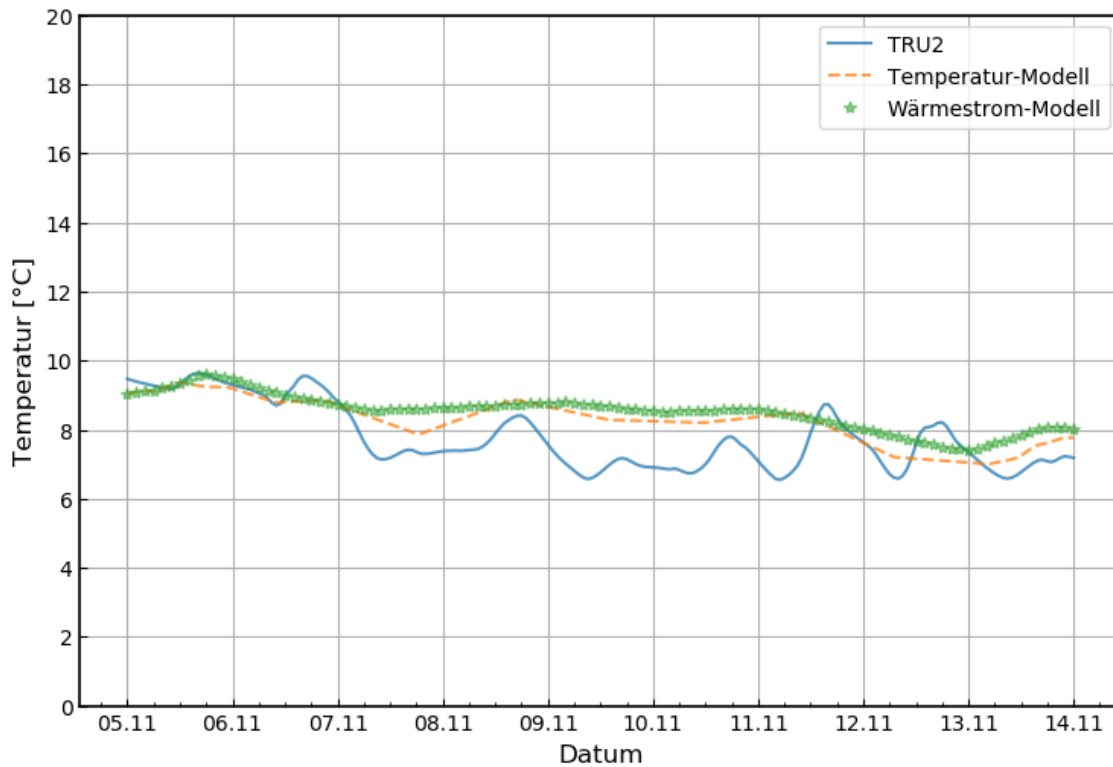


Abb. 3-6 Testfeld A1.1 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung

### 3.2 Testfeld A1.2

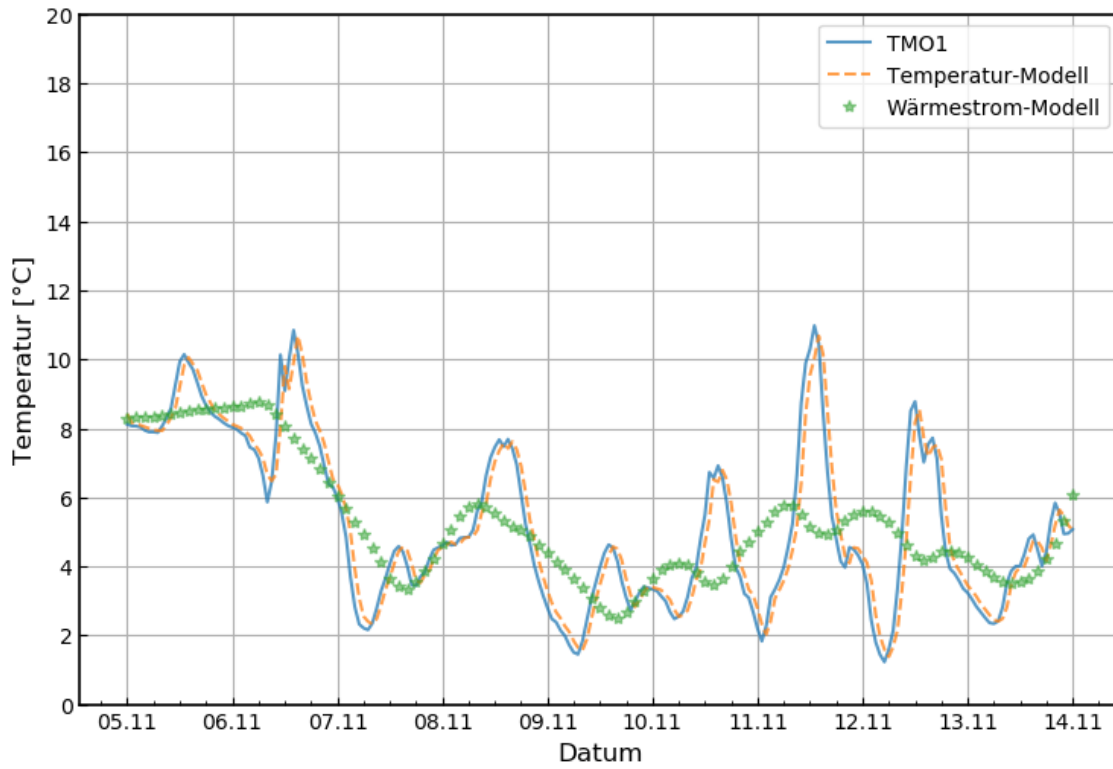


Abb. 3-7 Testfeld A1.2 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

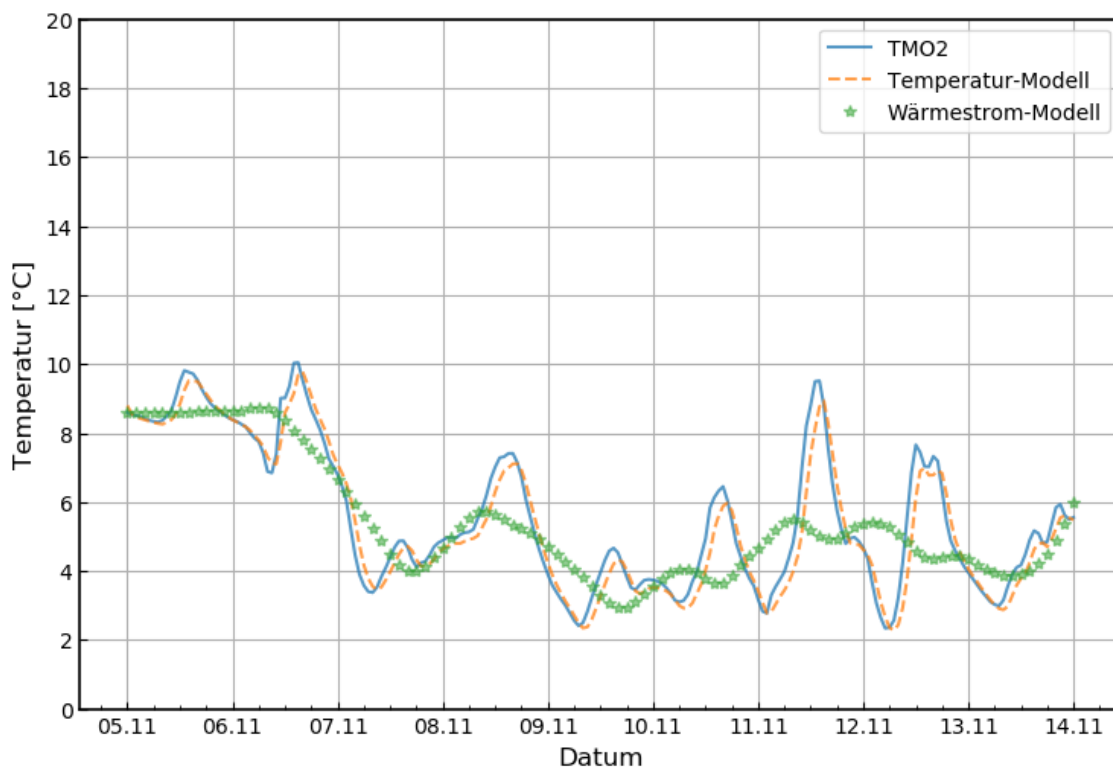


Abb. 3-8 Testfeld A1.2 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung

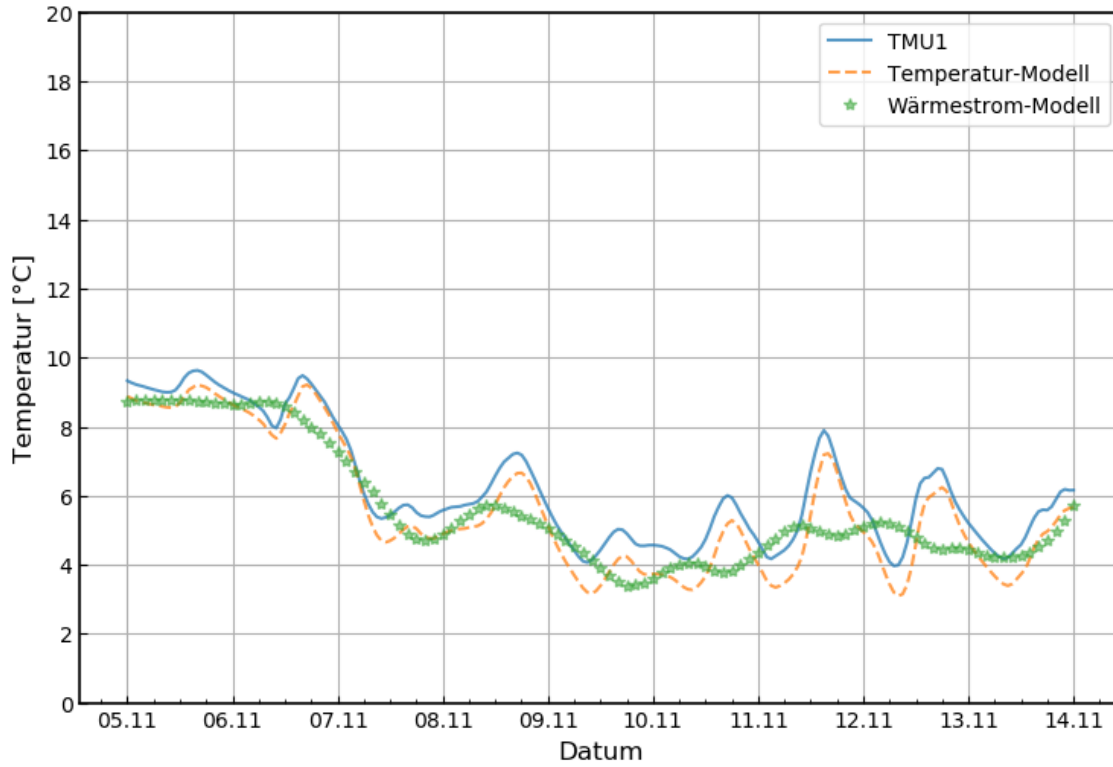


Abb. 3-9 Testfeld A1.2 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

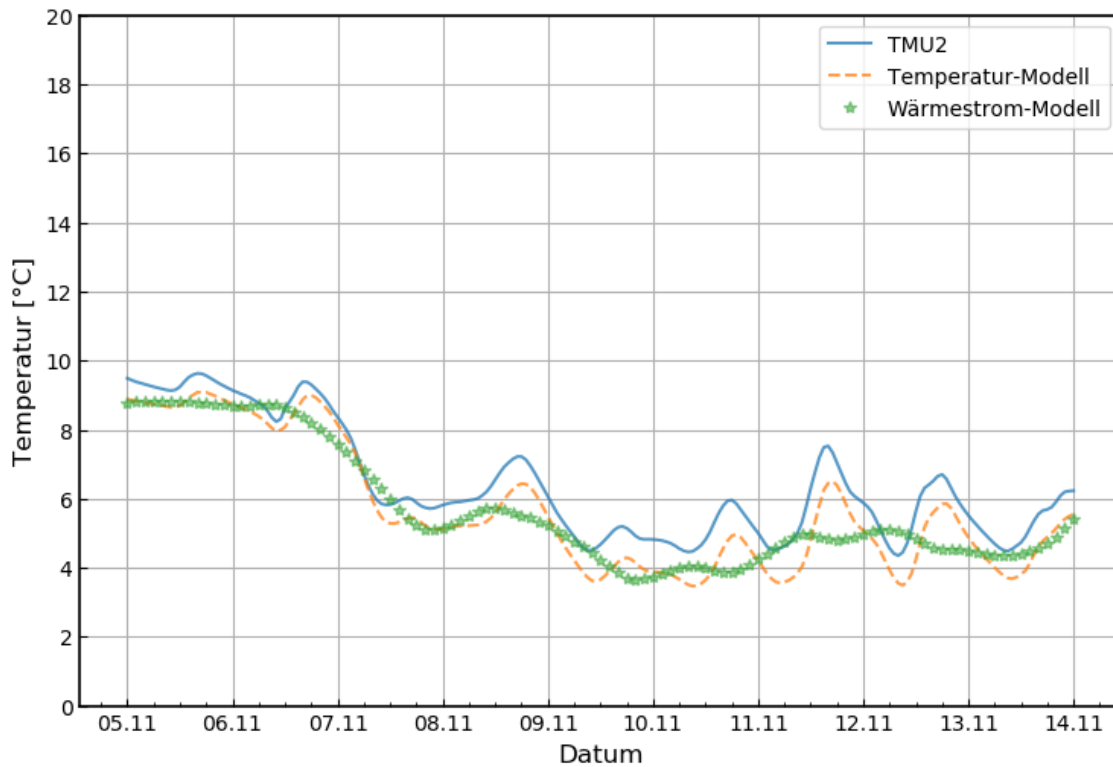


Abb. 3-10 Testfeld A1.2 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung

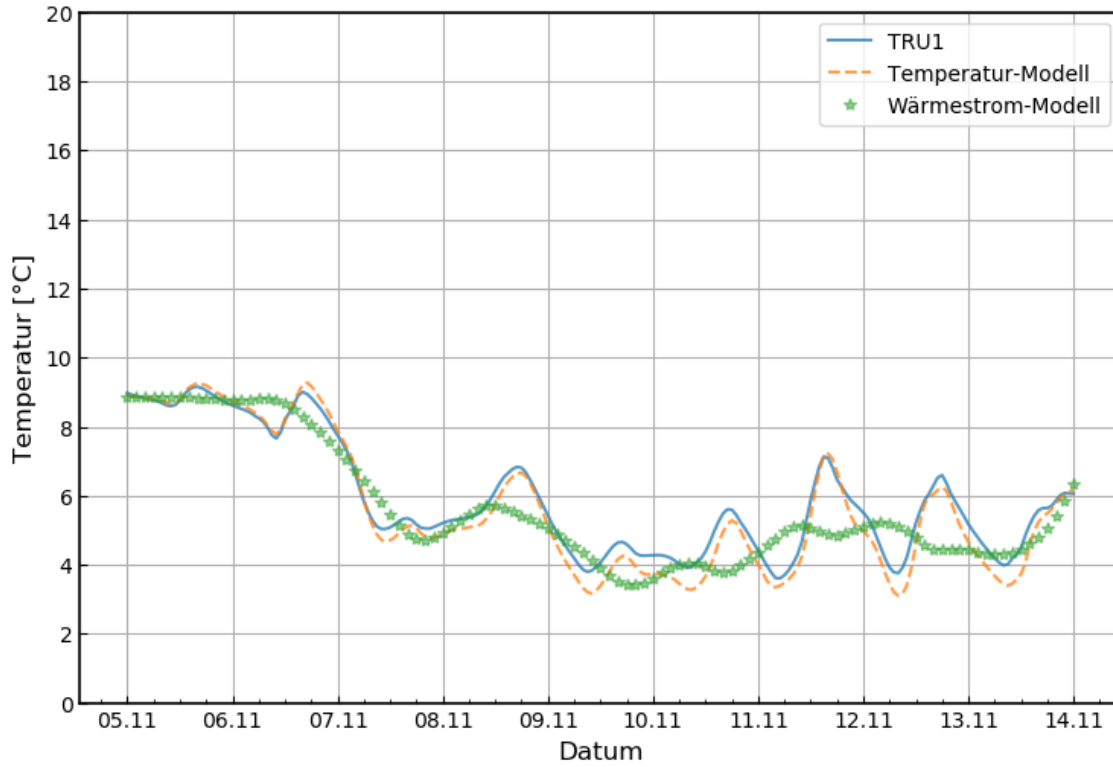


Abb. 3-11 Testfeld A1.2 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

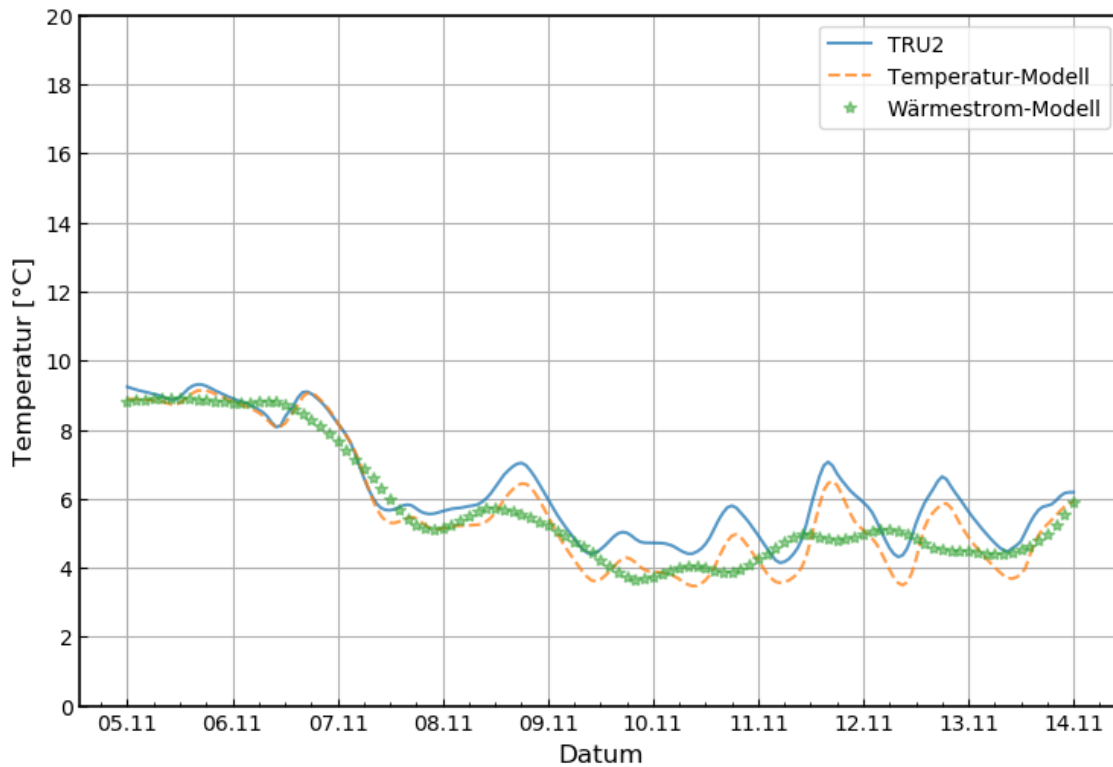


Abb. 3-12 Testfeld A1.2 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung

### 3.3 Testfeld A1.3

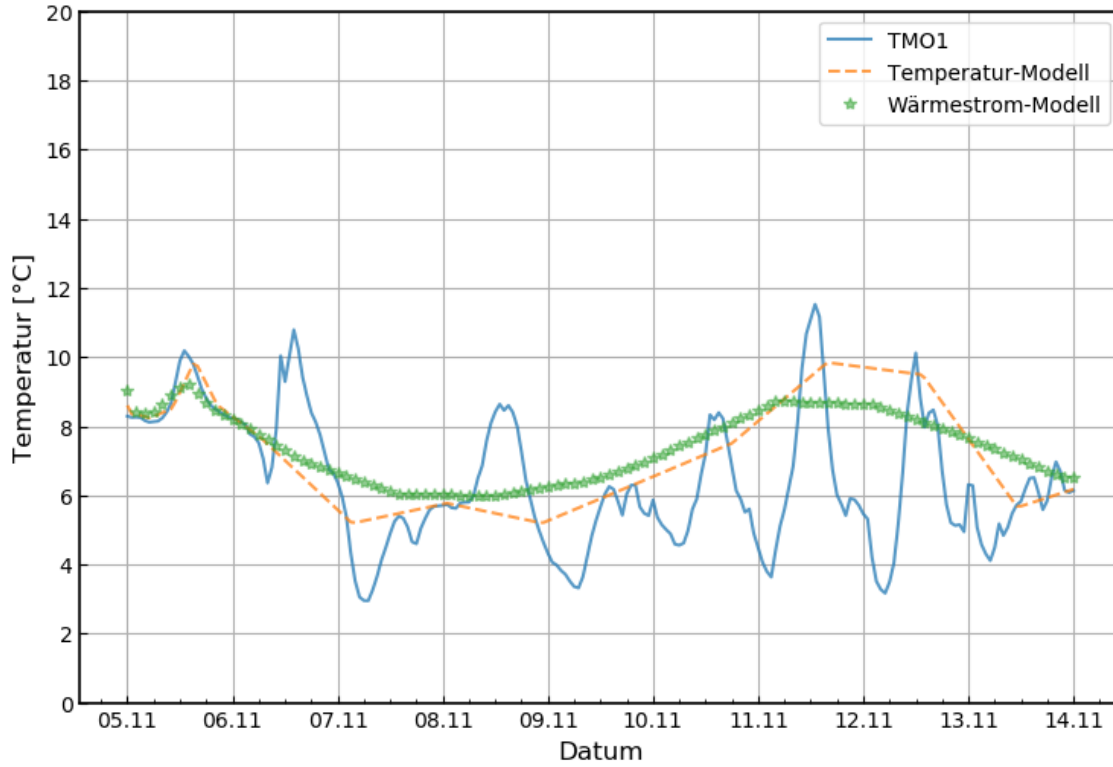


Abb. 3-13 Testfeld A1.3 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

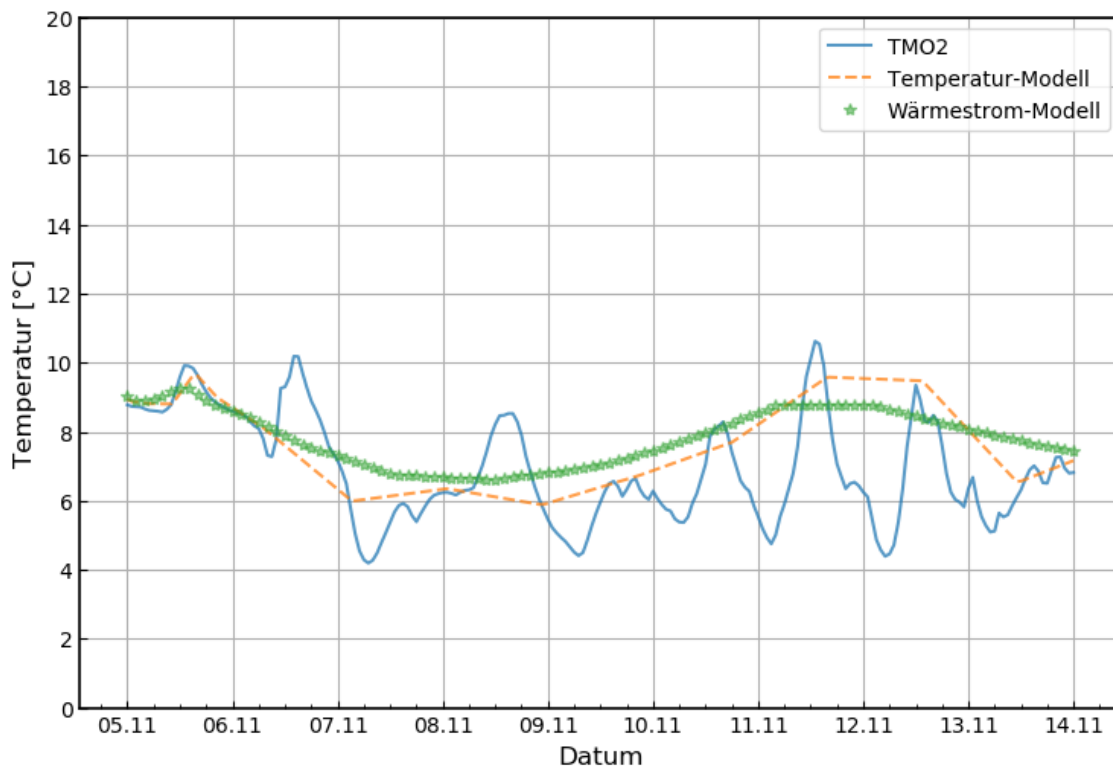


Abb. 3-14 Testfeld A1.3 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung

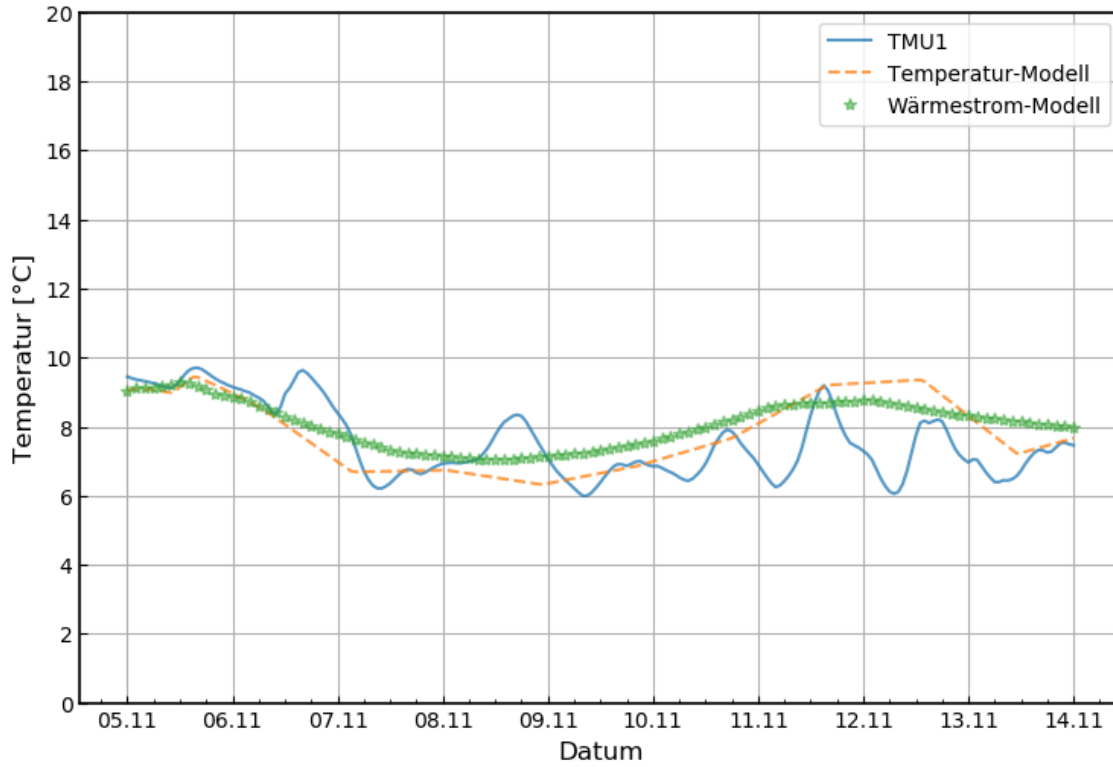


Abb. 3-15 Testfeld A1.3 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

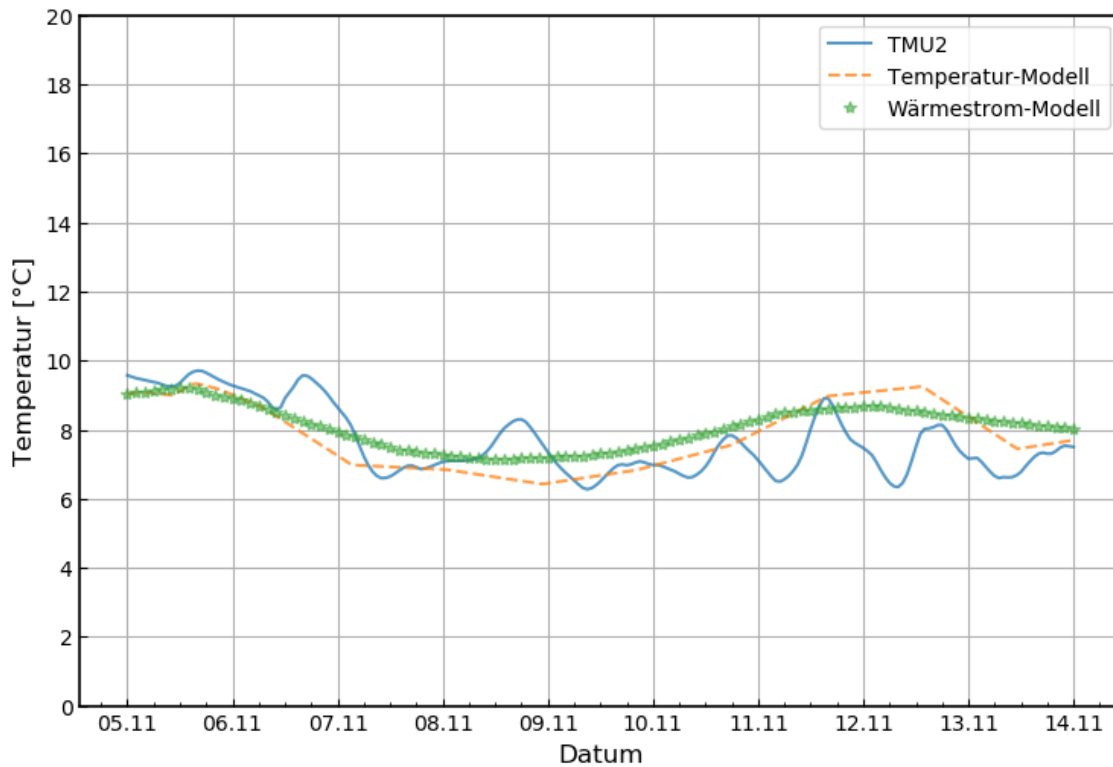


Abb. 3-16 Testfeld A1.3 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung

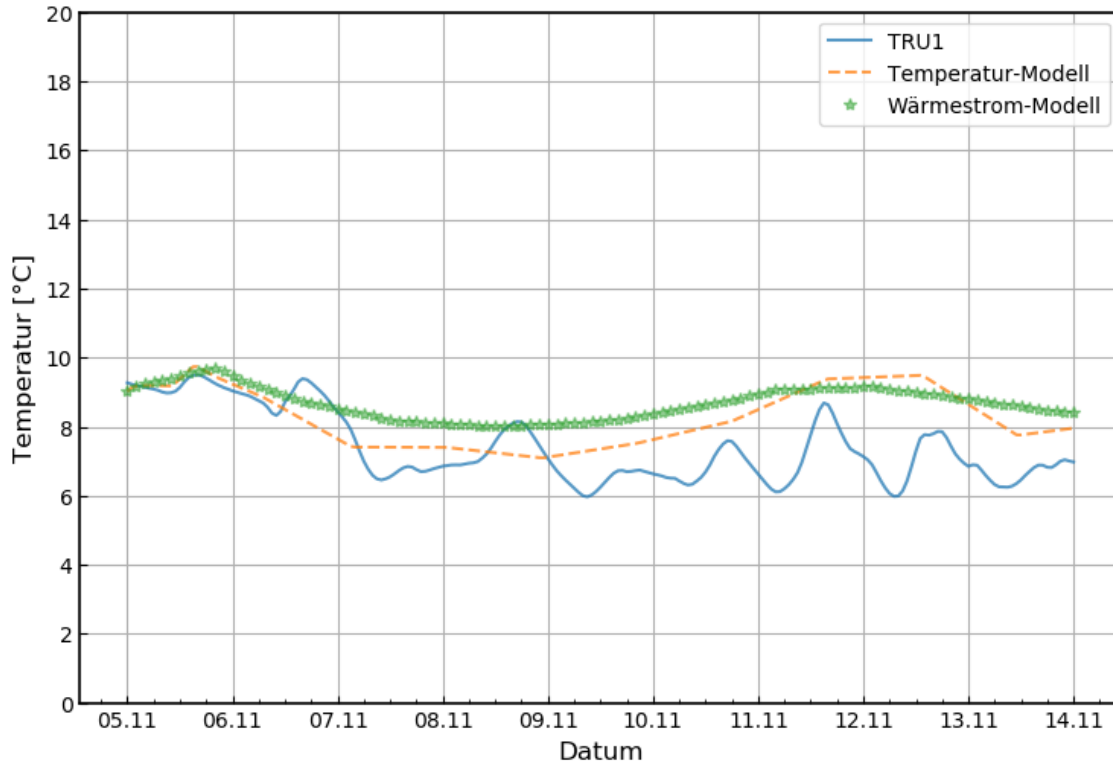


Abb. 3-17 Testfeld A1.3 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

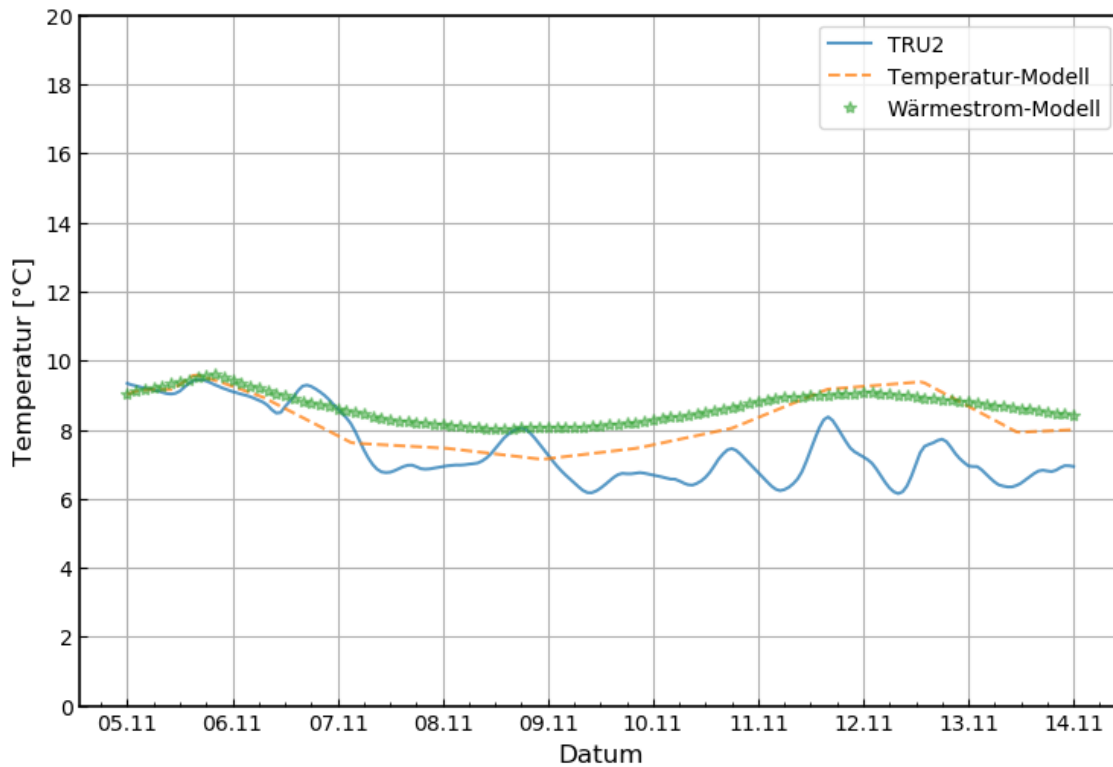


Abb. 3-18 Testfeld A1.3 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung

### 3.4 Testfeld A1.4

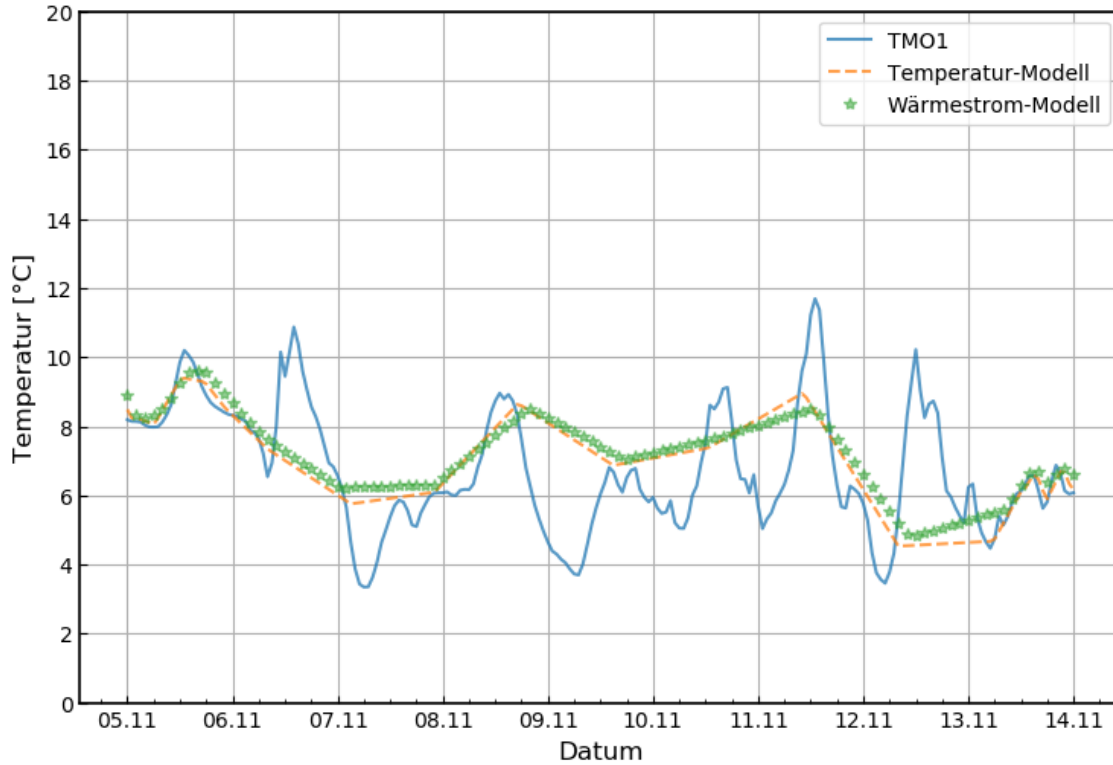


Abb. 3-19 Testfeld A1.4 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

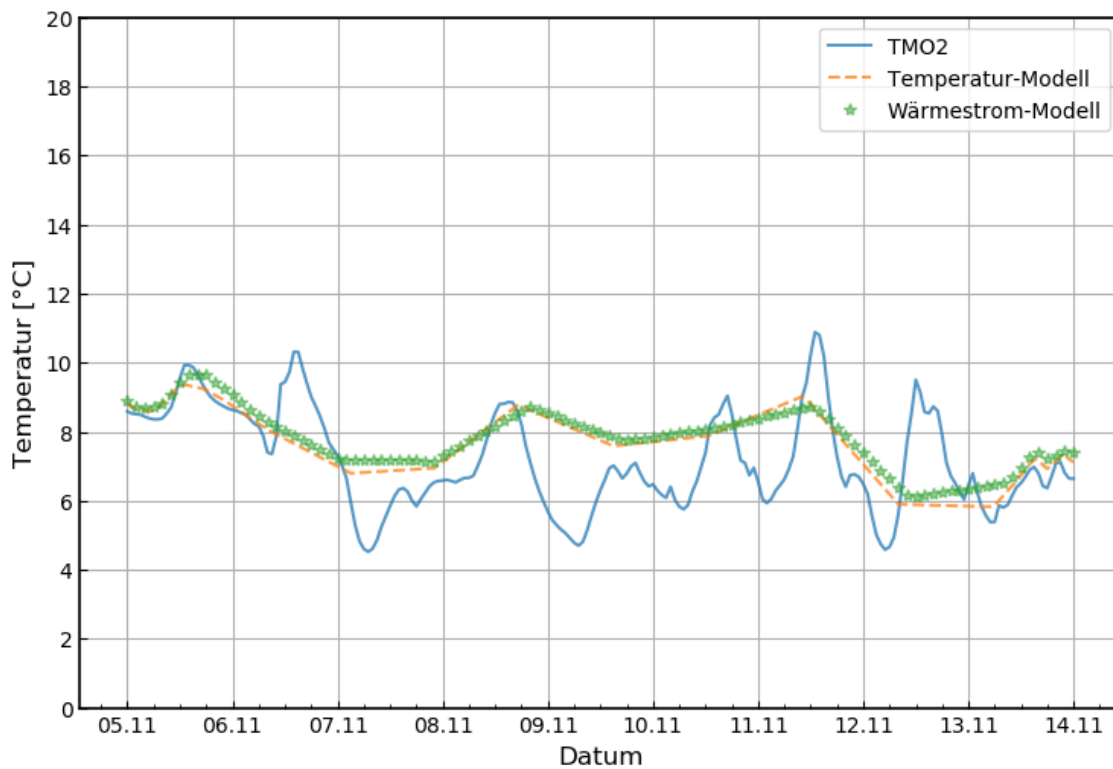


Abb. 3-20 Testfeld A1.4 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung



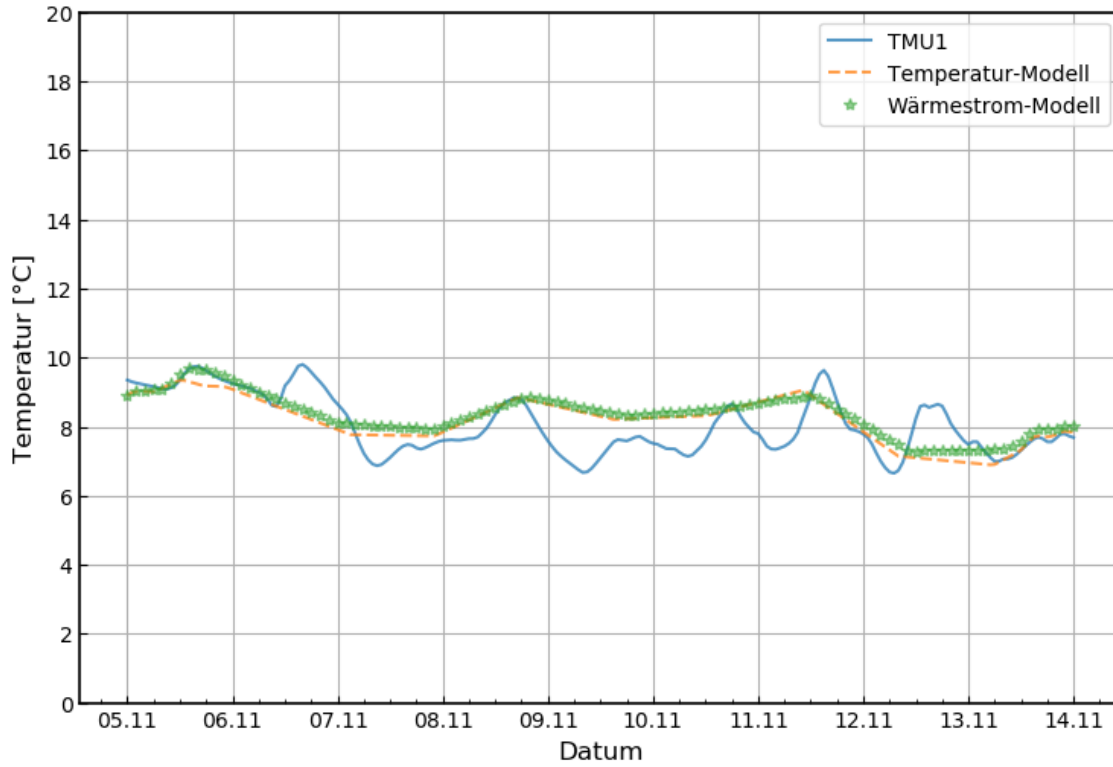


Abb. 3-21 Testfeld A1.4 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

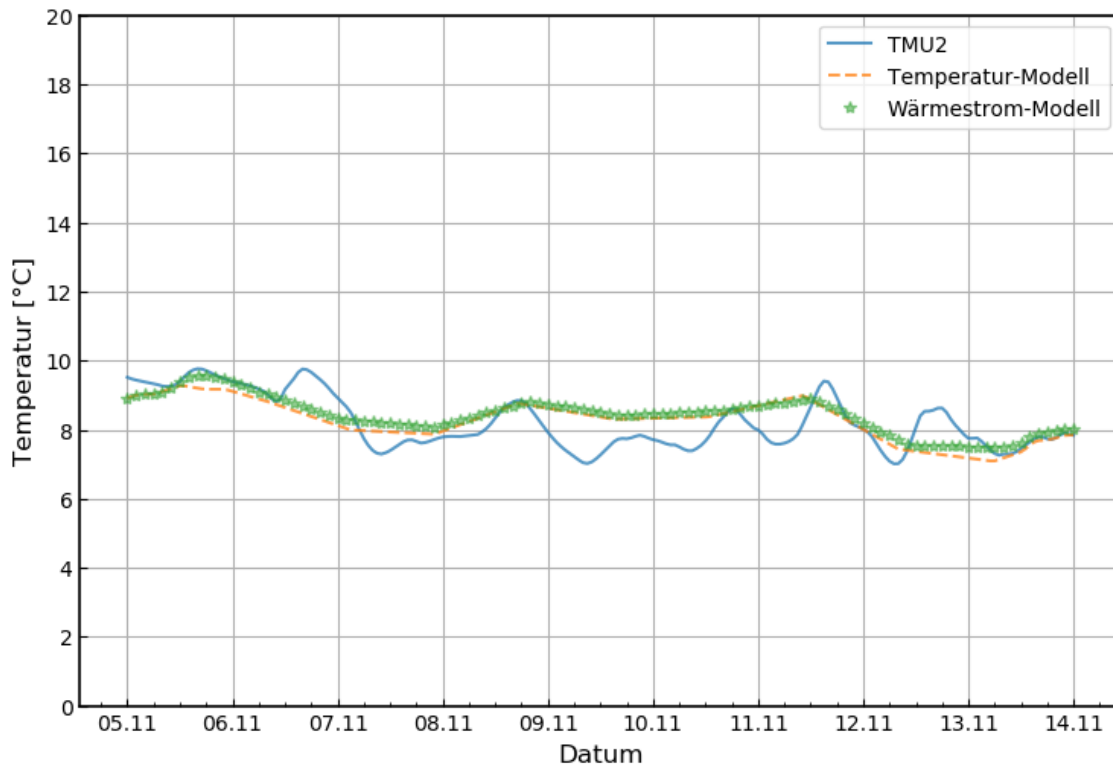


Abb. 3-22 Testfeld A1.4 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung

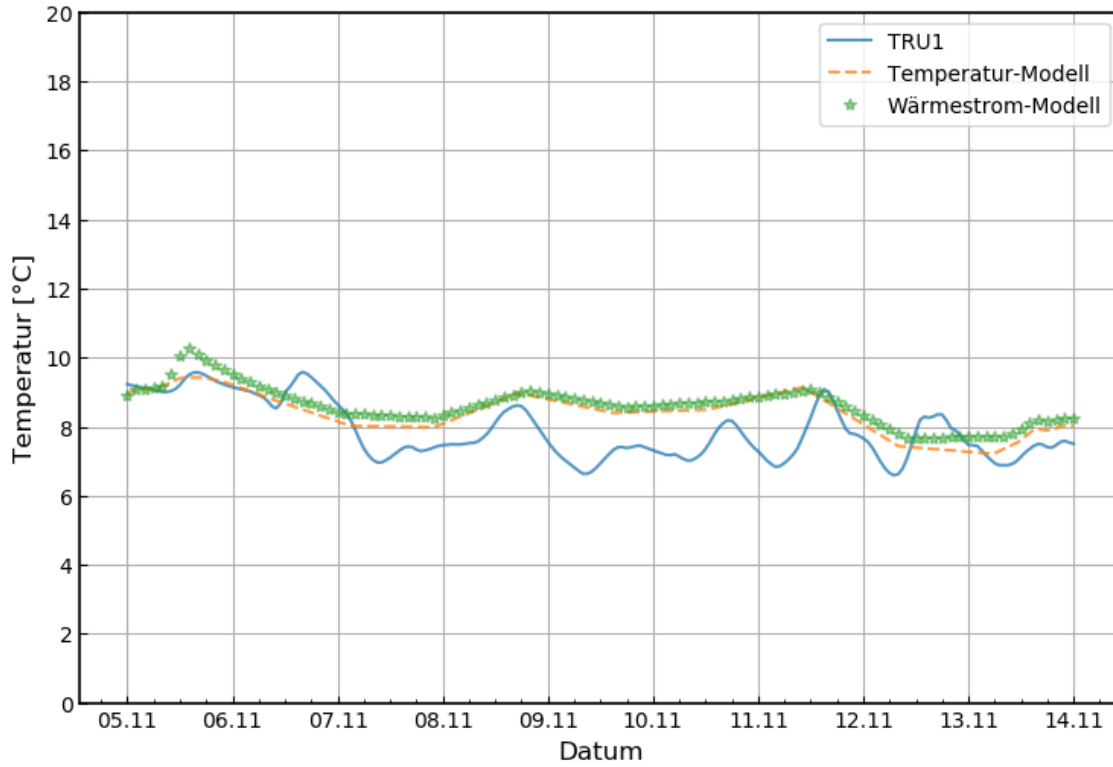


Abb. 3-23 Testfeld A1.4 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

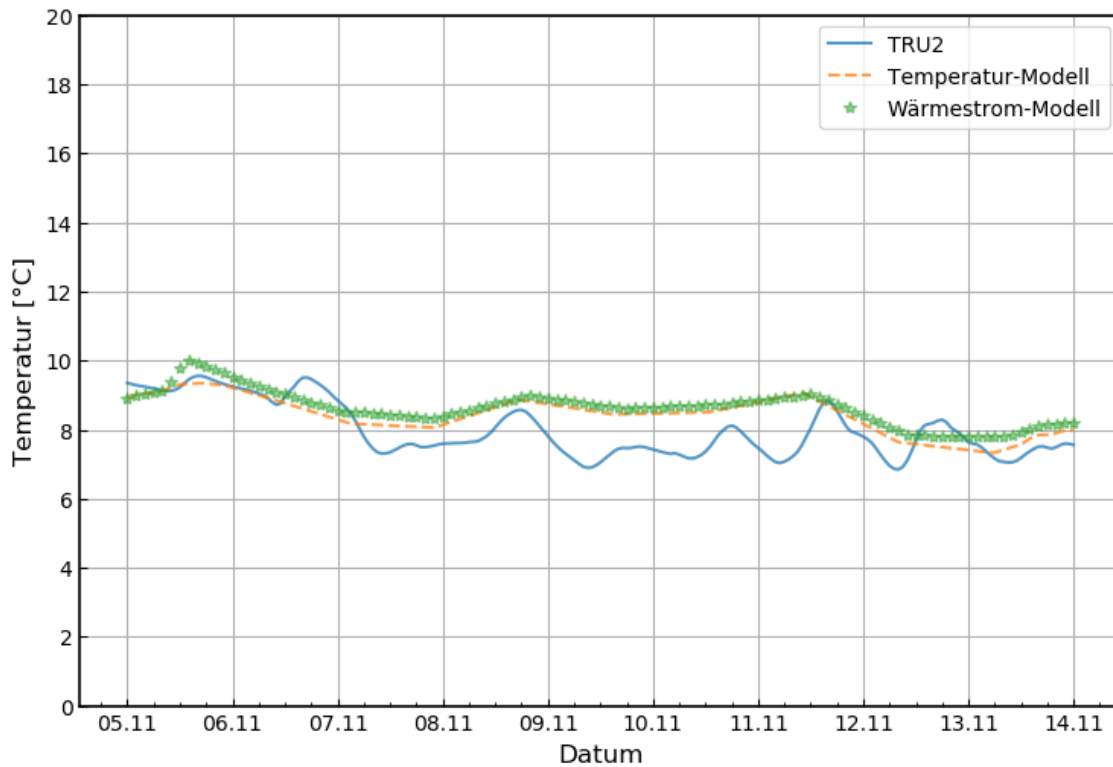


Abb. 3-24 Testfeld A1.4 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

### 3.5 Testfeld A1.5

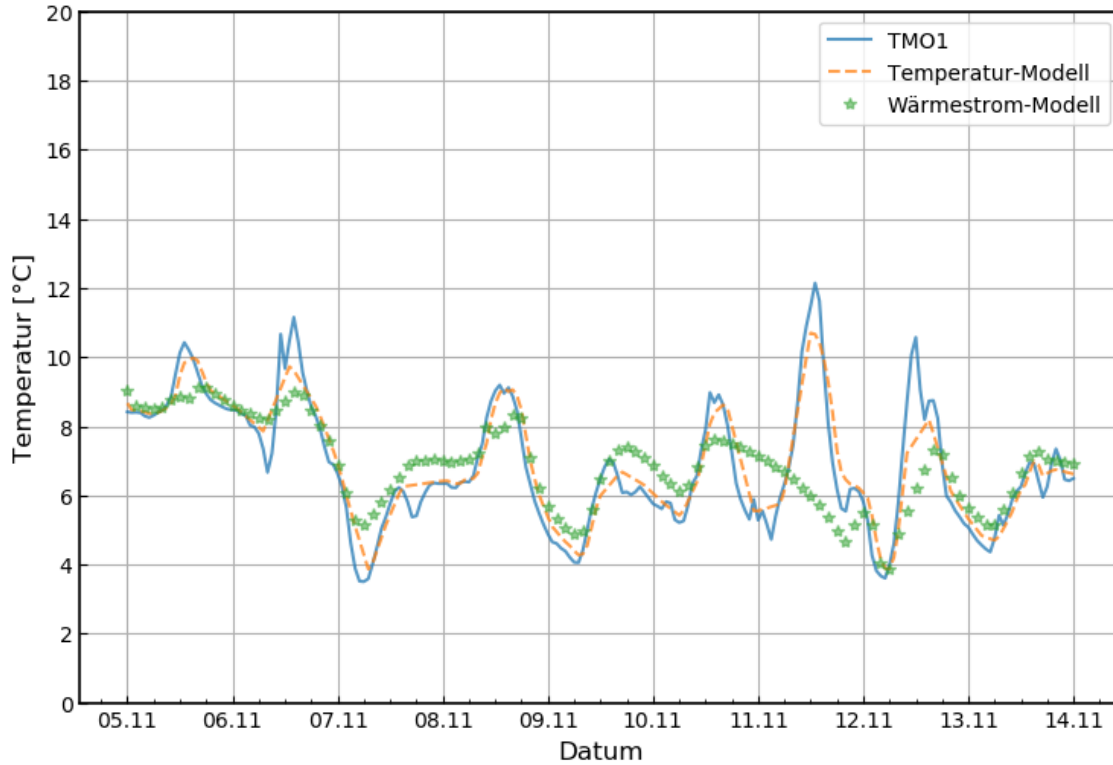


Abb. 3-25 Testfeld A1.5 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

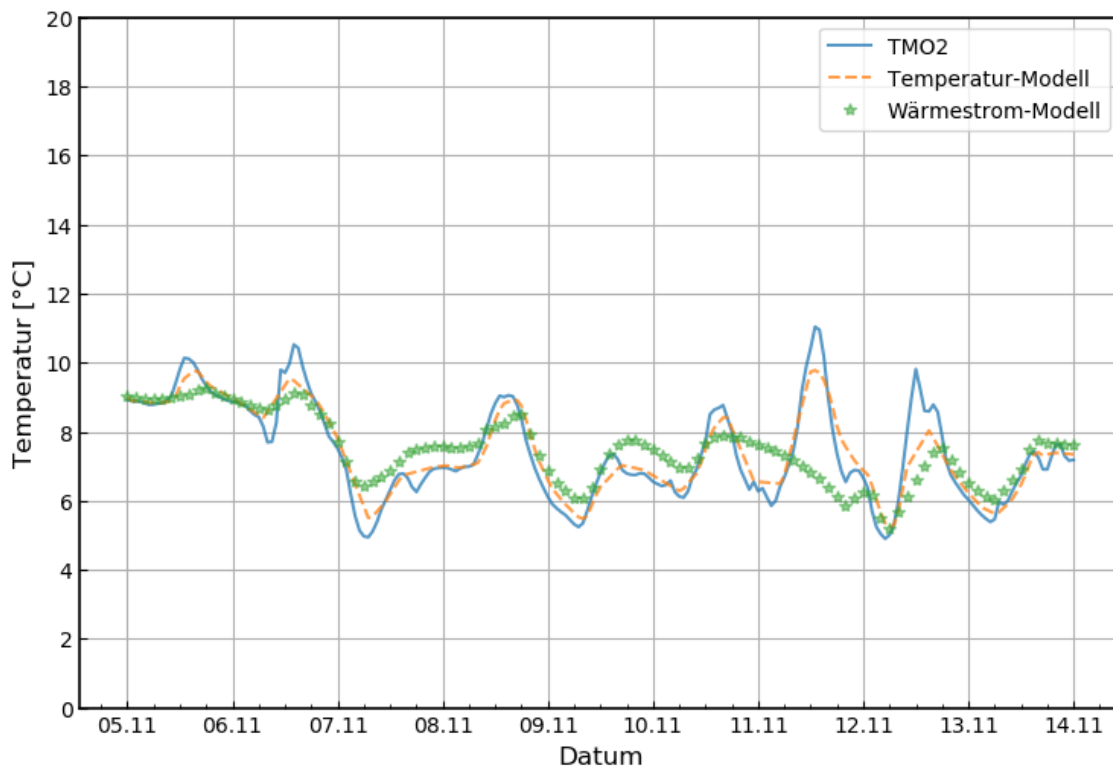


Abb. 3-26 Testfeld A1.5 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung

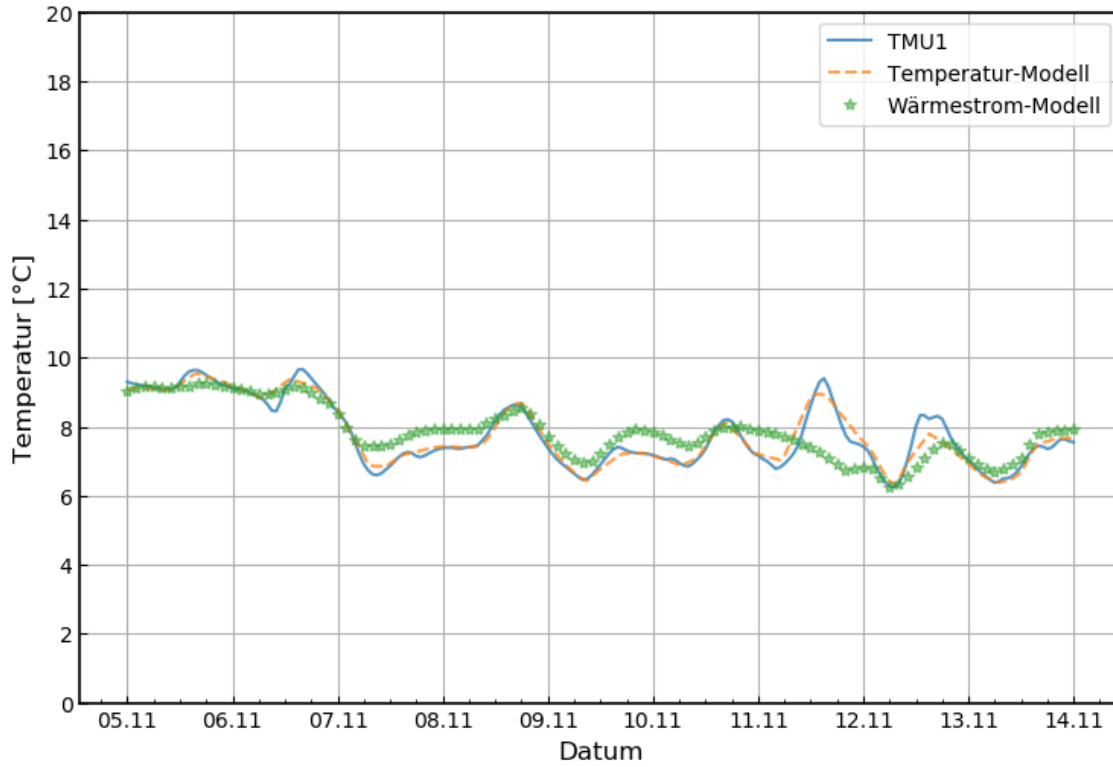


Abb. 3-27 Testfeld A1.5 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

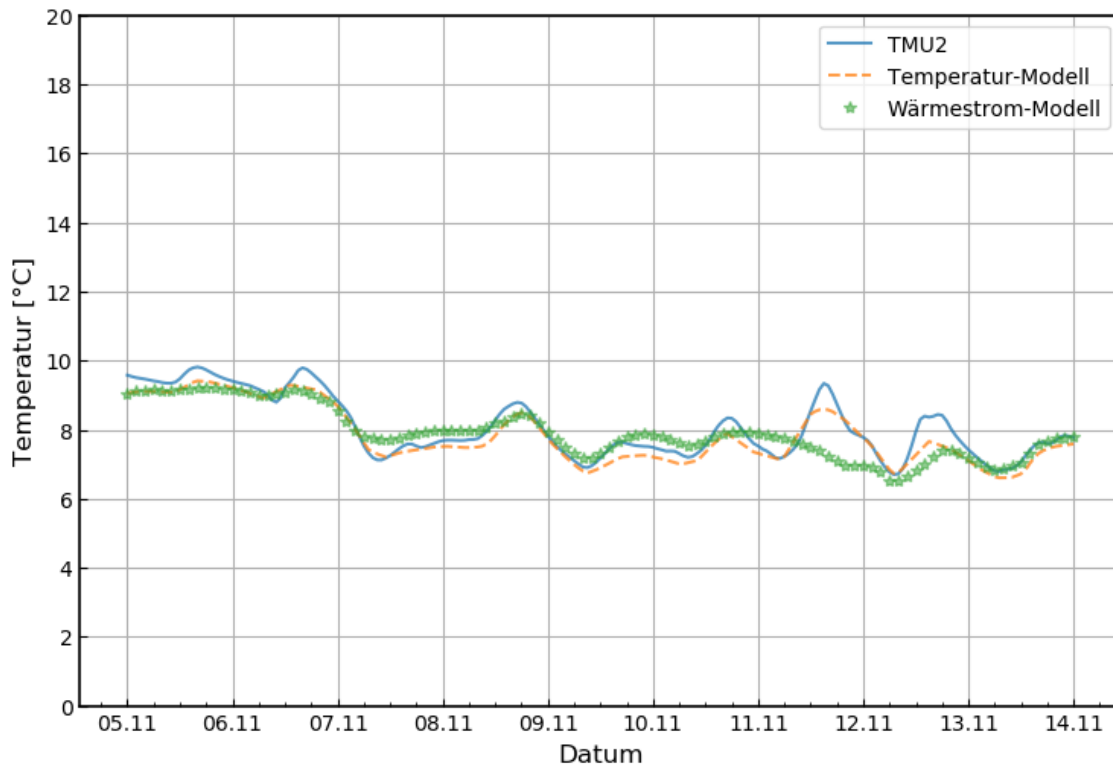


Abb. 3-28 Testfeld A1.5 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung

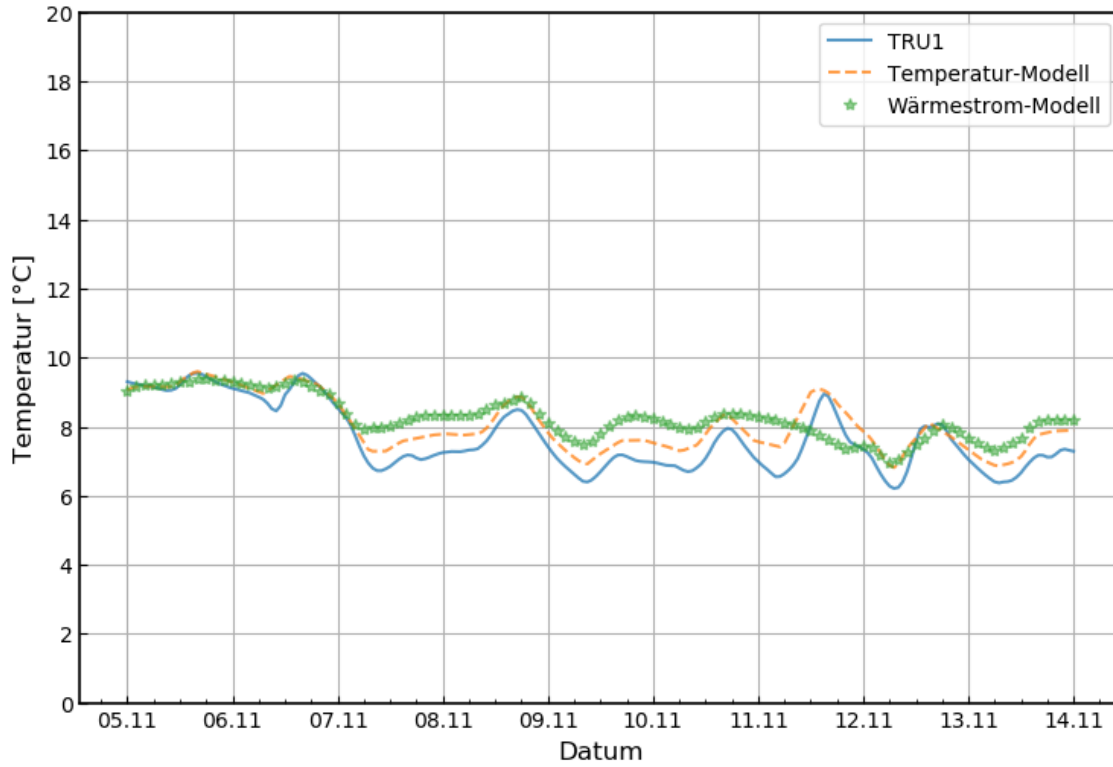


Abb. 3-29 Testfeld A1.5 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

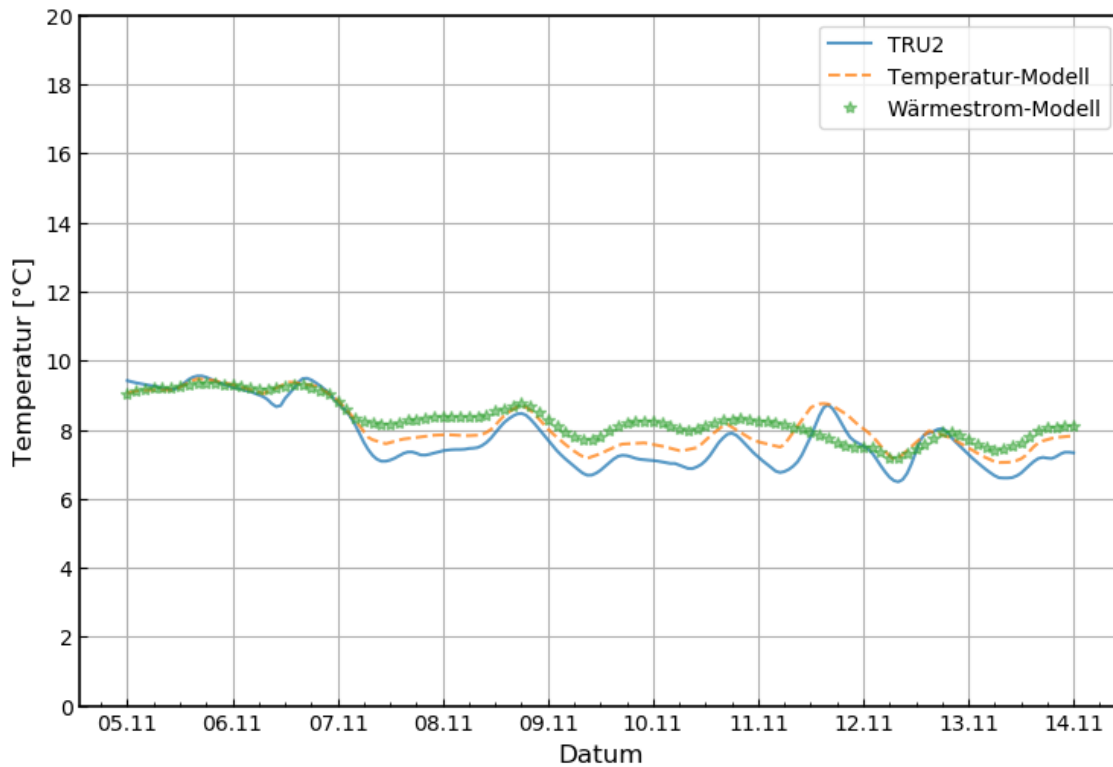


Abb. 3-30 Testfeld A1.5 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung

### 3.6 Testfeld B1.1

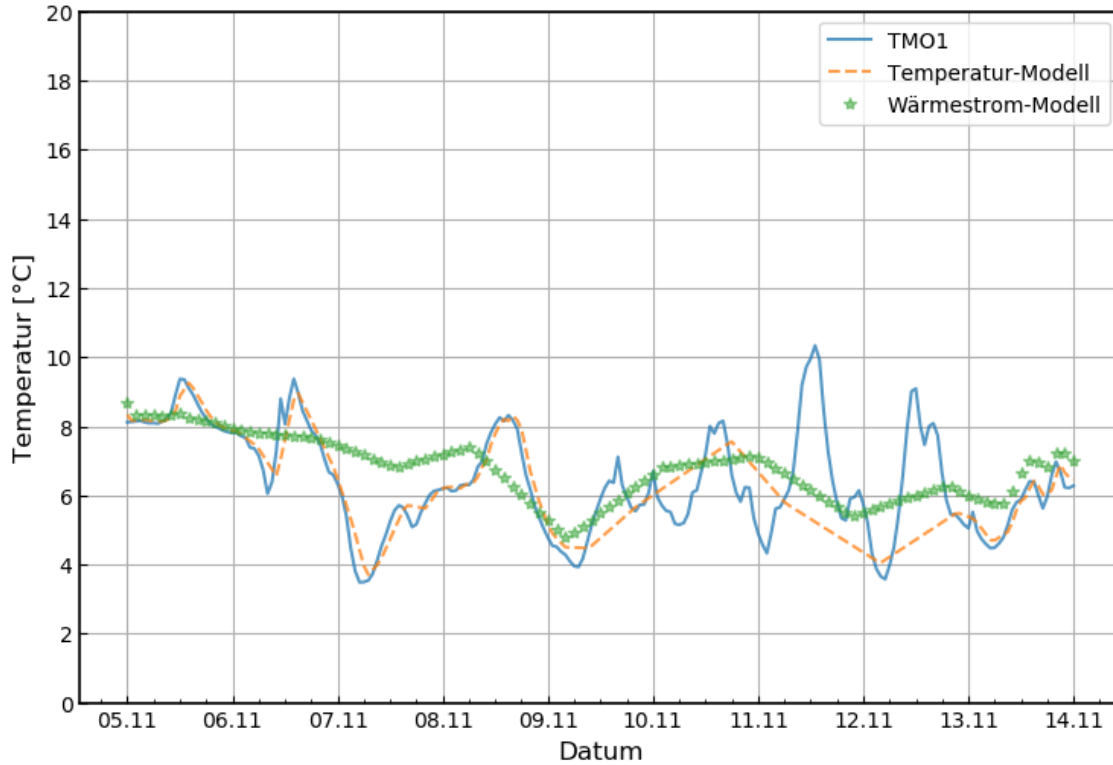


Abb. 3-31 Testfeld B1.1 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

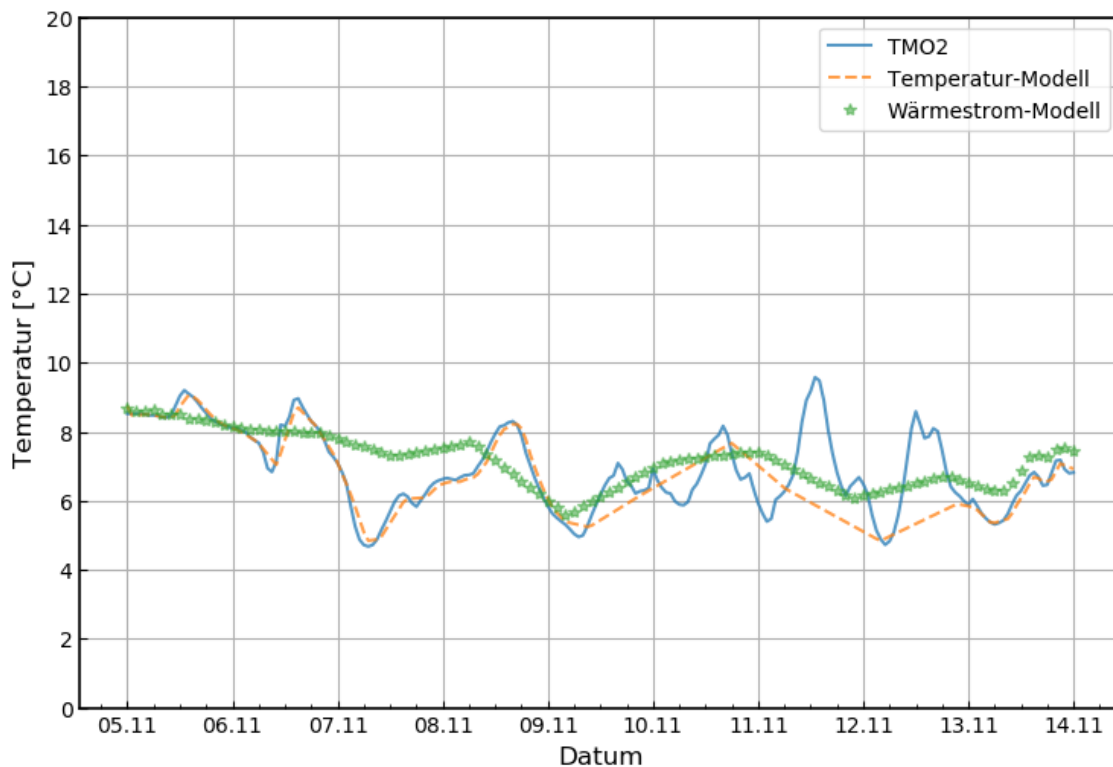


Abb. 3-32 Testfeld B1.1 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

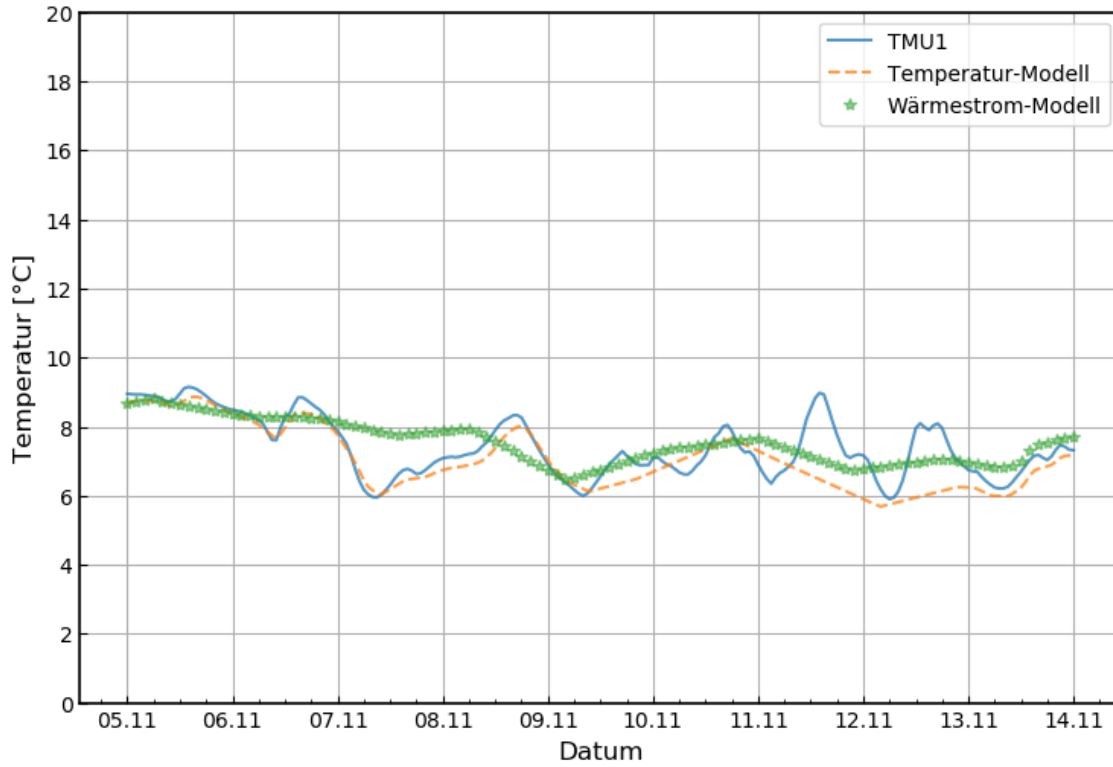


Abb. 3-33 Testfeld B1.1 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

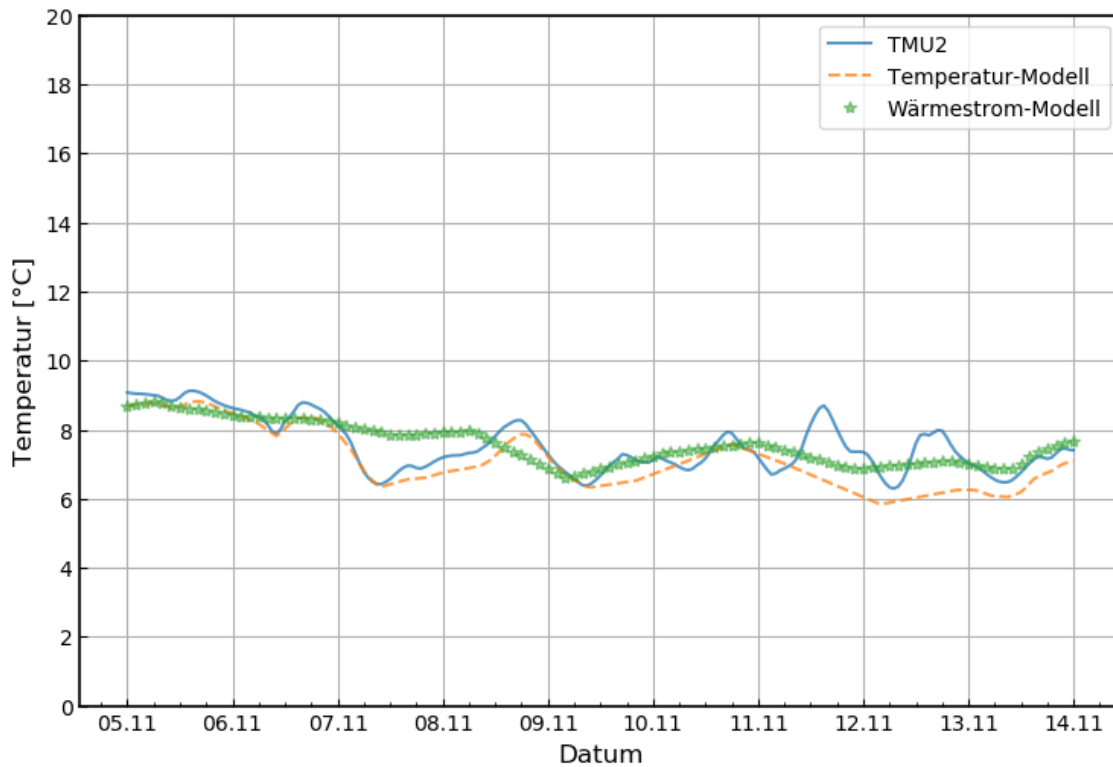


Abb. 3-34 Testfeld B1.1 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung

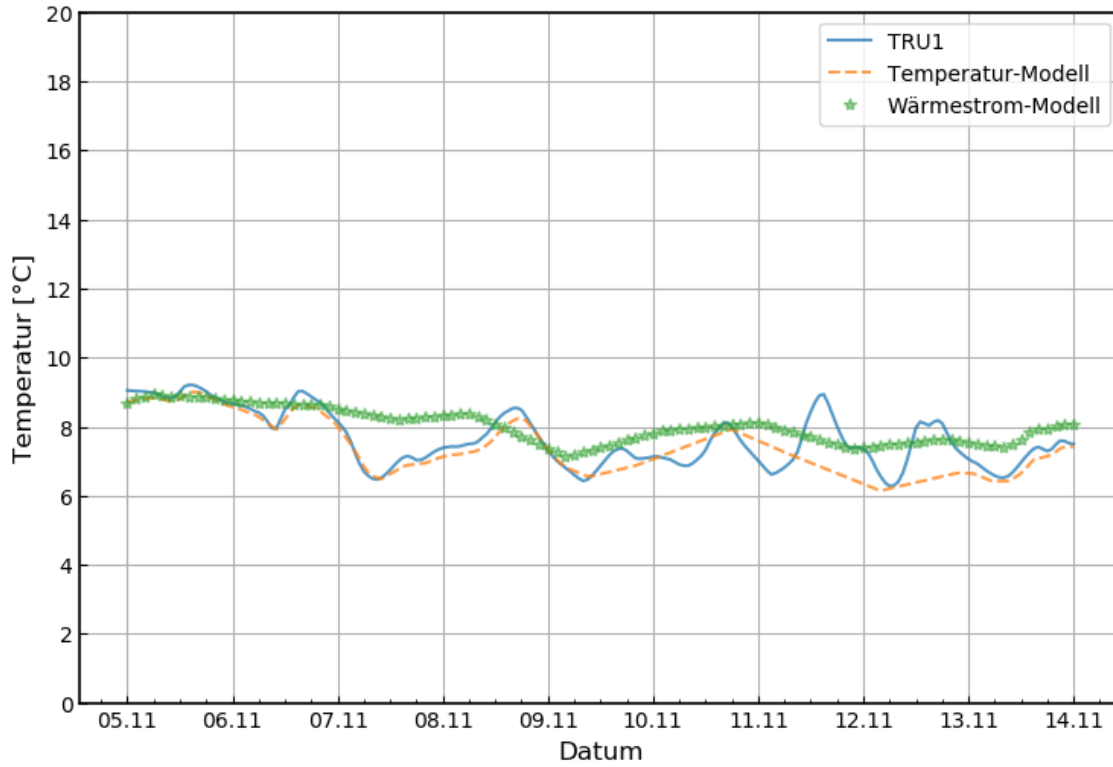


Abb. 3-35 Testfeld B1.1 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

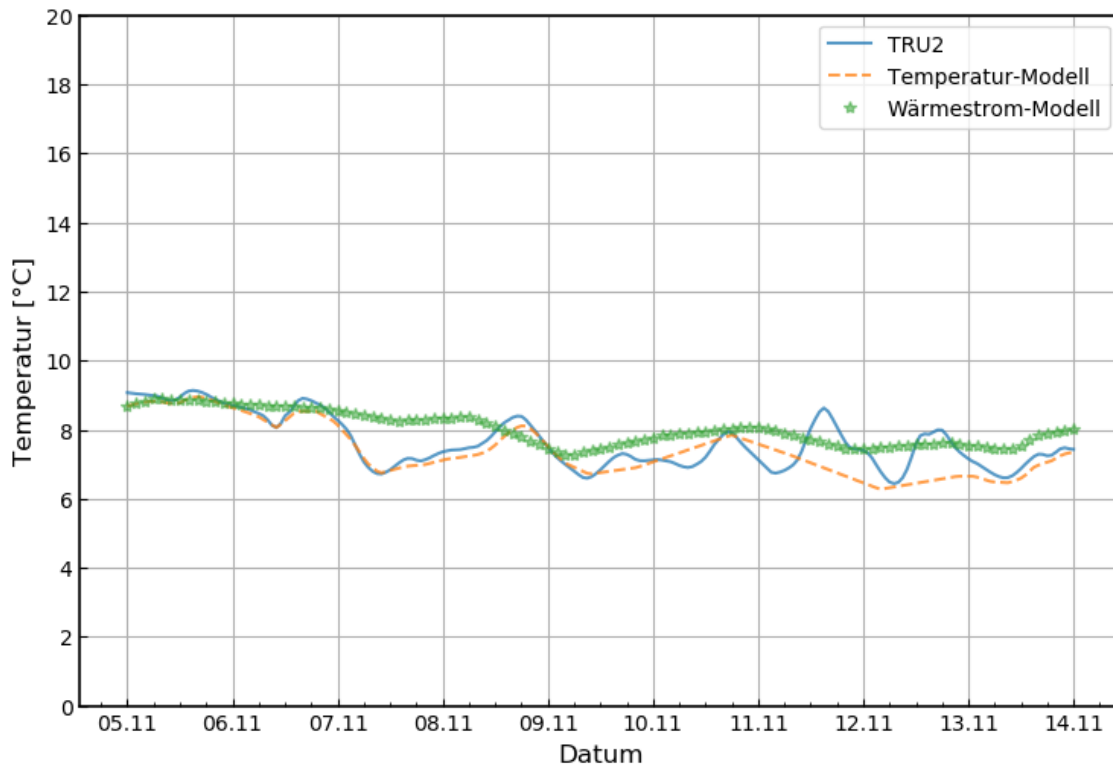


Abb. 3-36 Testfeld B1.1 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung



### 3.7 Testfeld B1.2

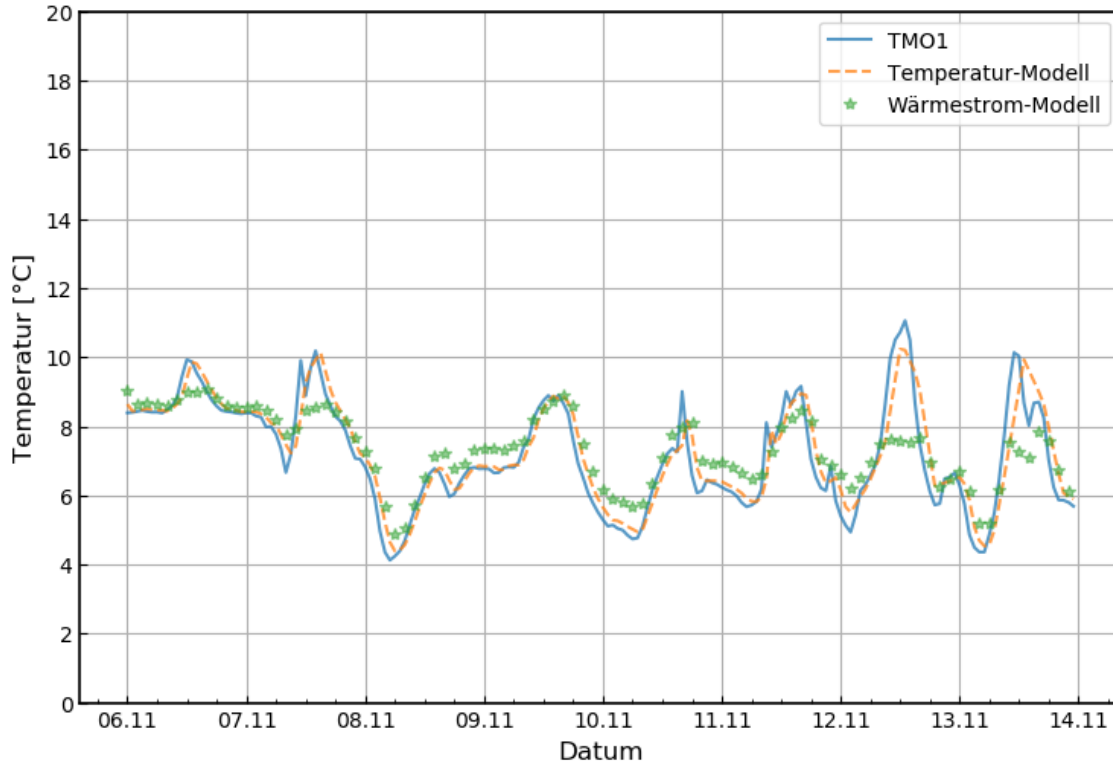


Abb. 3-37 Testfeld B1.2 – Sensor TMO1 - Validierung laminare Durchströmung

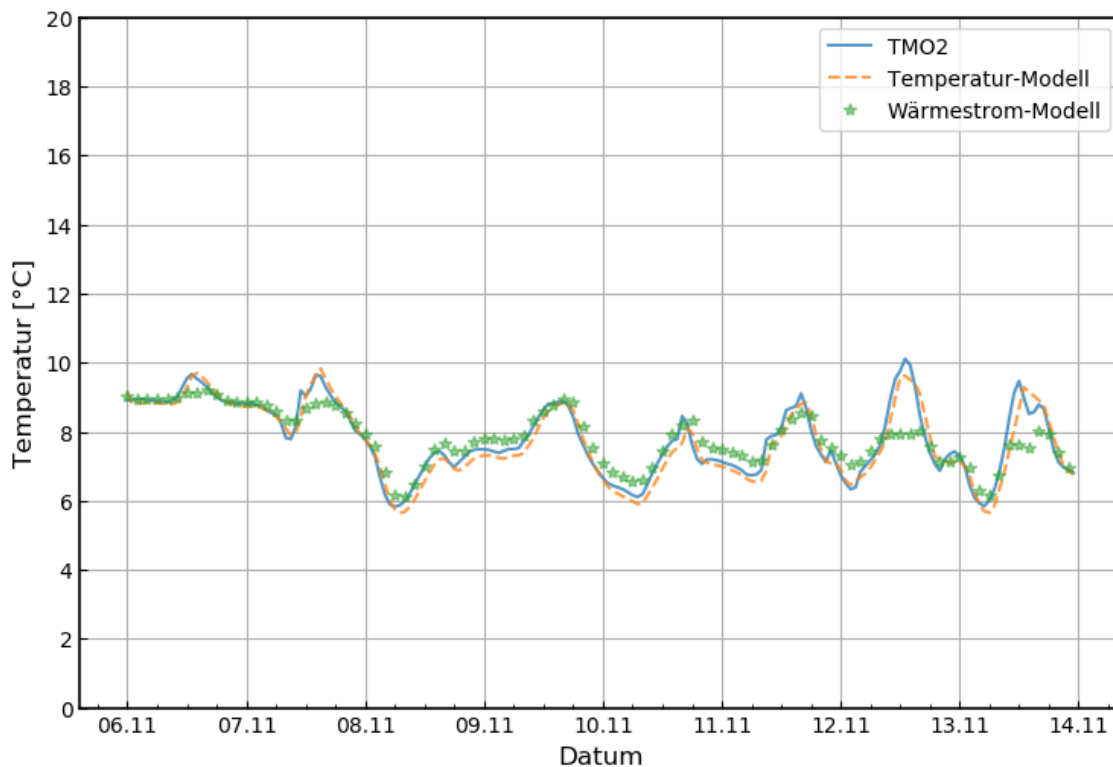


Abb. 3-38 Testfeld B1.2 – Sensor TMO2 - Validierung laminare Durchströmung

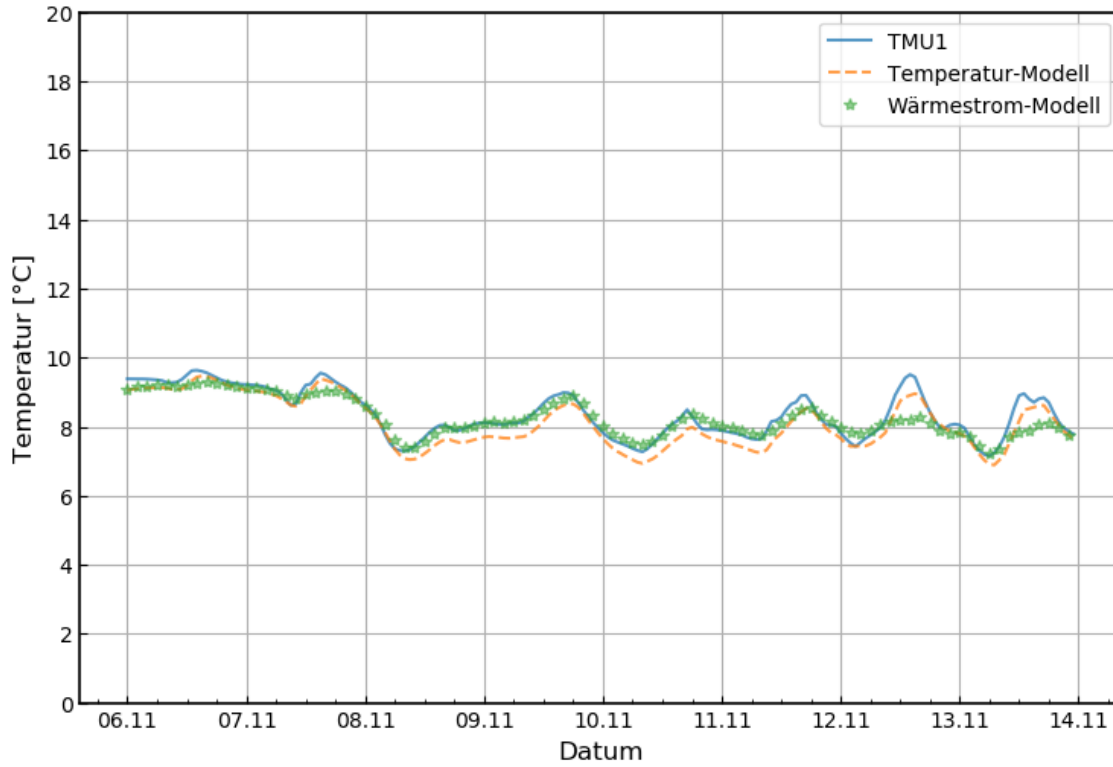


Abb. 3-39 Testfeld B1.2 – Sensor TMU1 - Validierung laminare Durchströmung

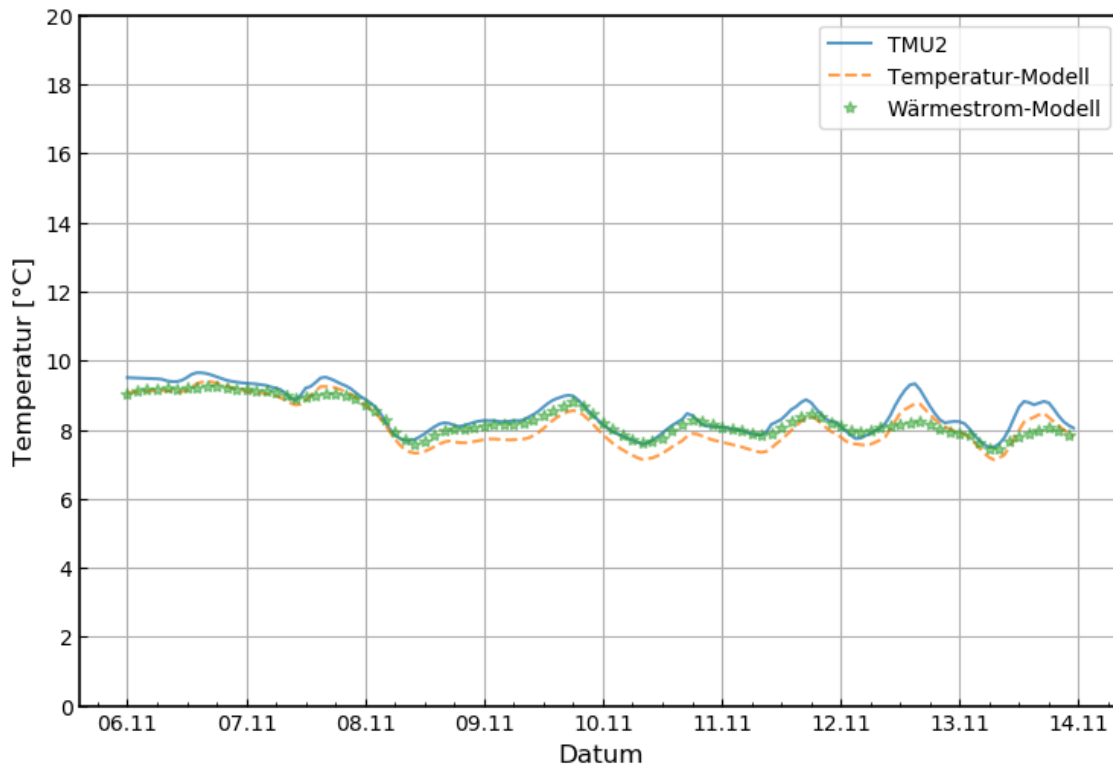


Abb. 3-40 Testfeld B1.2 – Sensor TMU2 - Validierung laminare Durchströmung

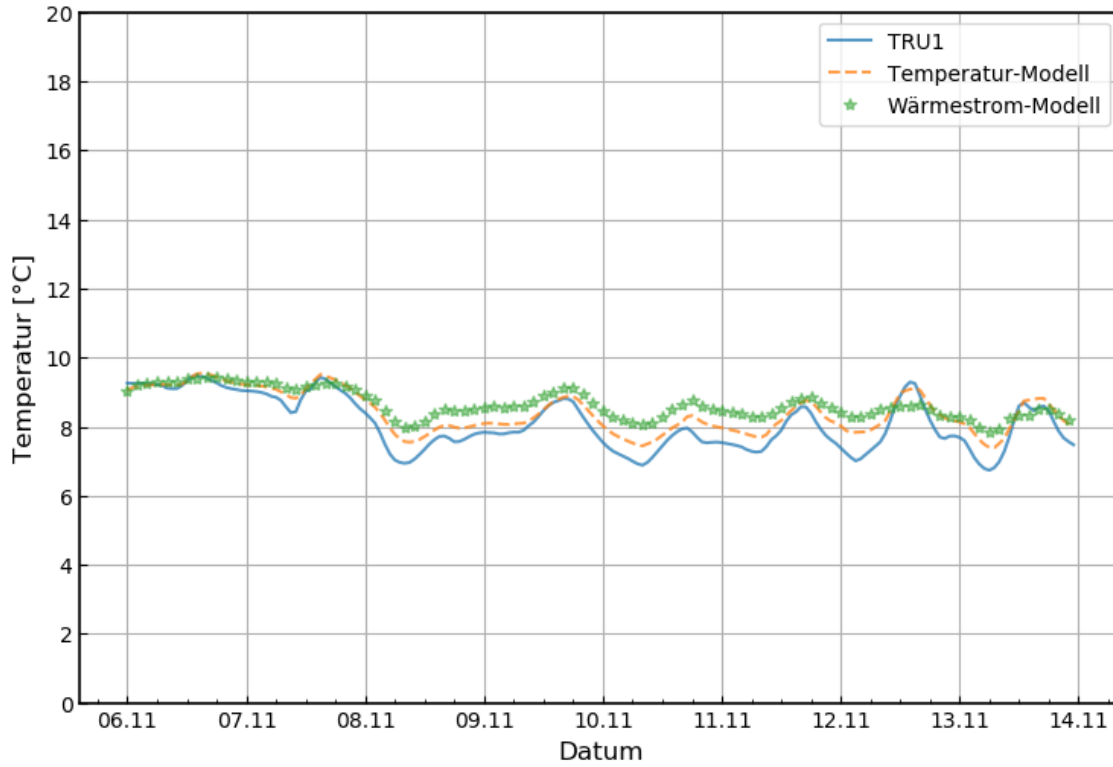


Abb. 3-41 Testfeld B1.2 – Sensor TRU1 - Validierung laminare Durchströmung

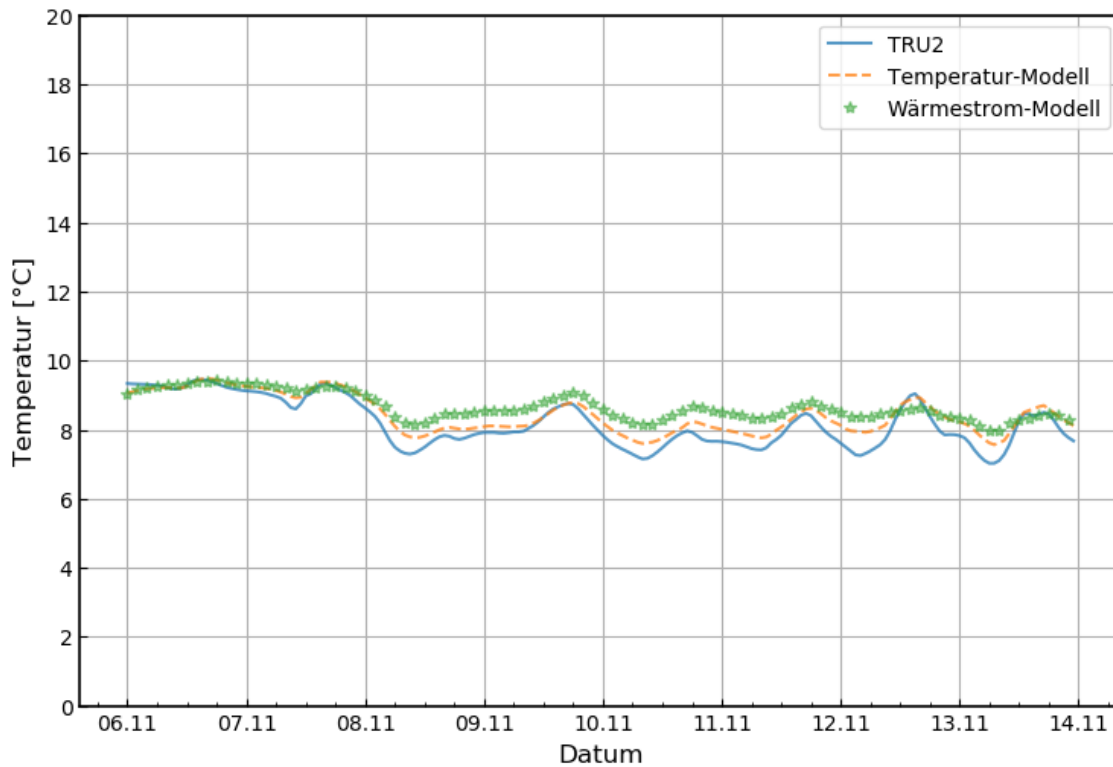


Abb. 3-42 Testfeld B1.2 – Sensor TRU2 - Validierung laminare Durchströmung



## 4 Turbulente Durchströmung

### 4.1 Testfeld A1.1

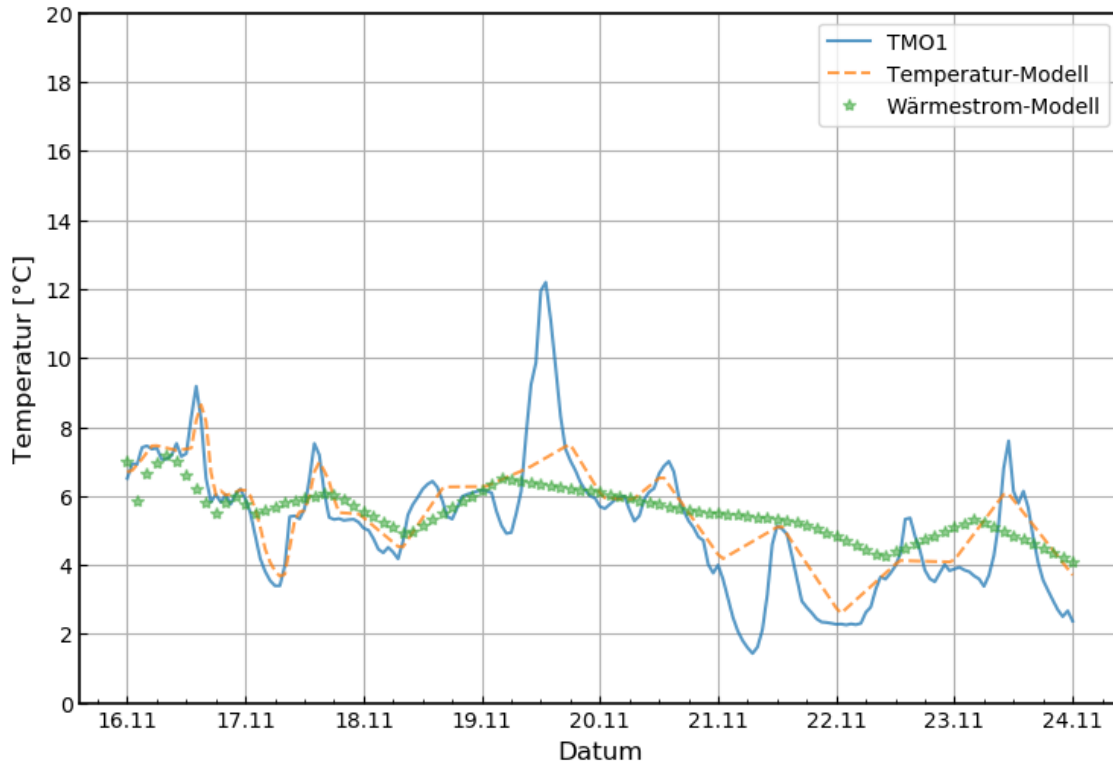


Abb. 4-1 Testfeld A1.1 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

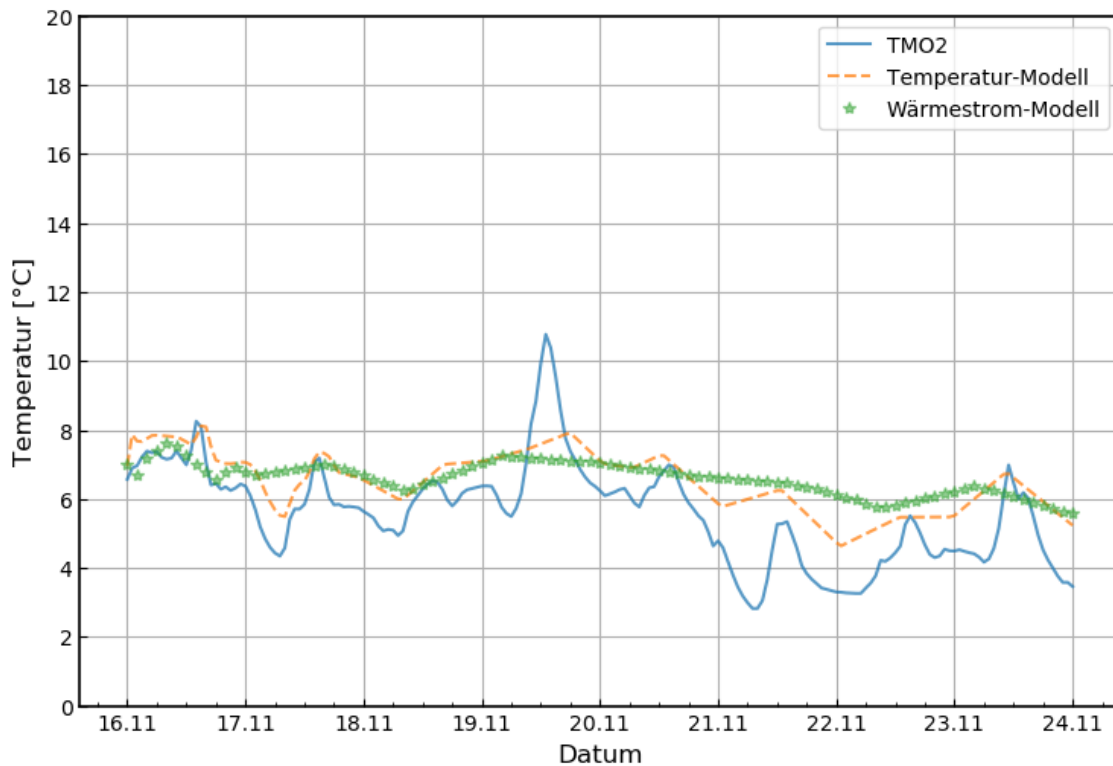


Abb. 4-2 Testfeld A1.1 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung

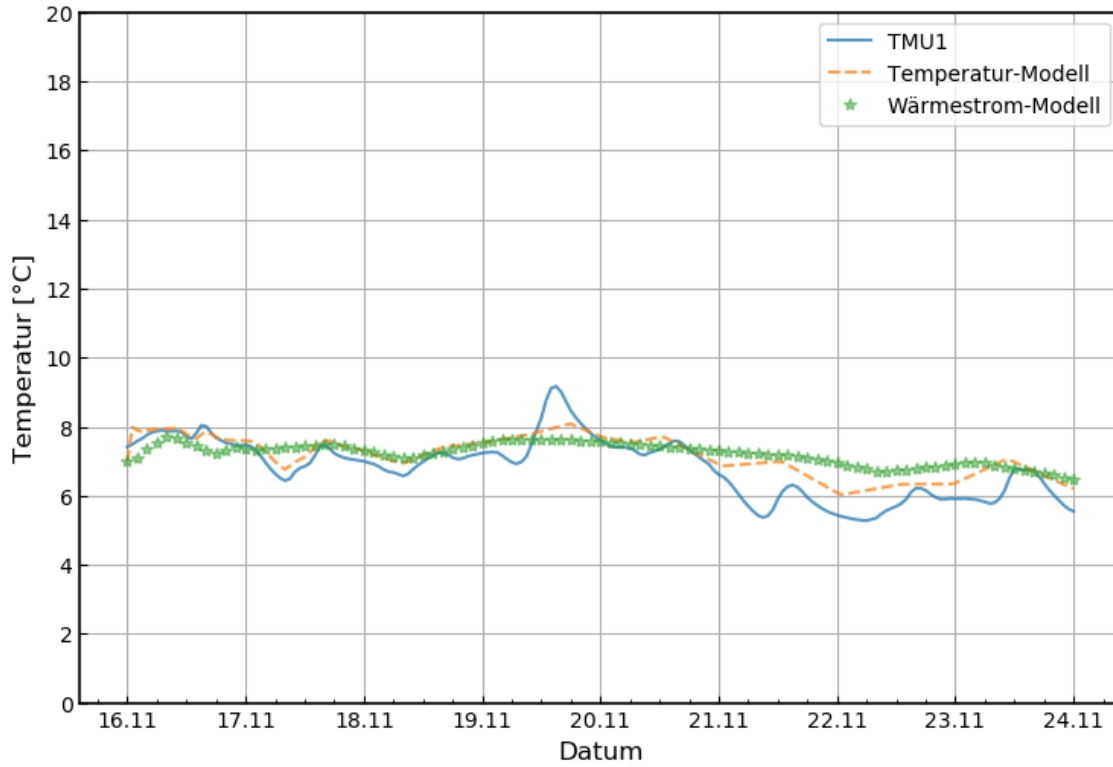


Abb. 4-3 Testfeld A1.1 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

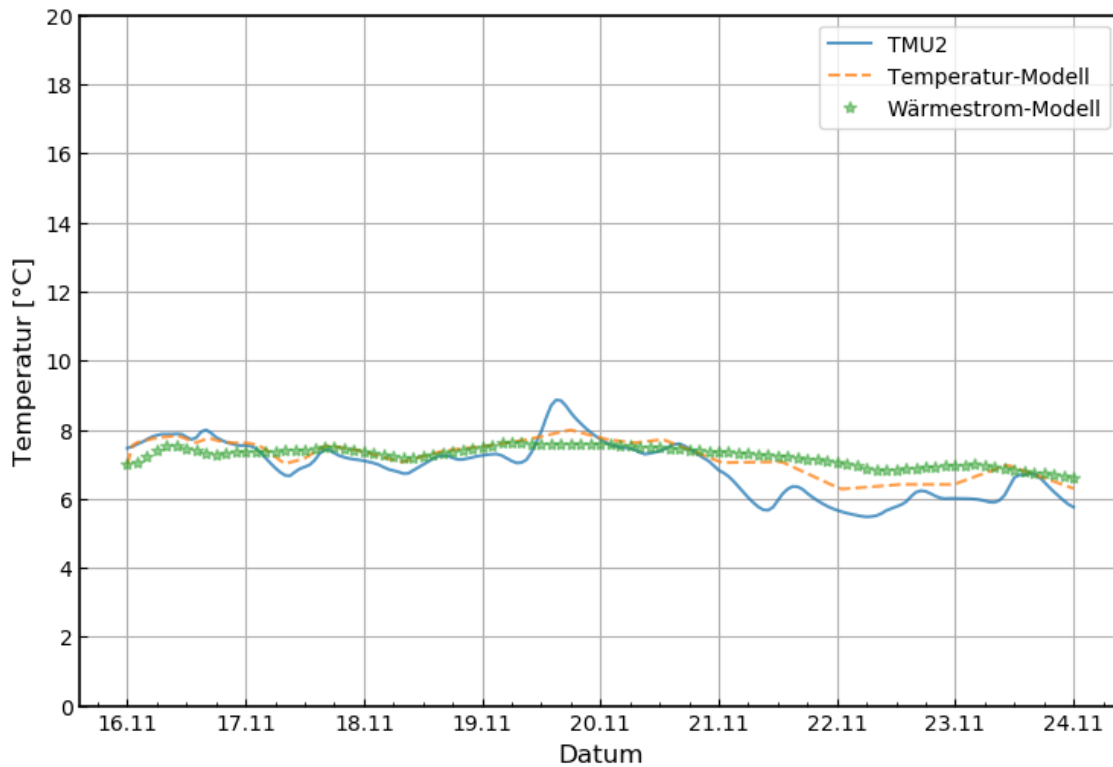


Abb. 4-4 Testfeld A1.1 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung

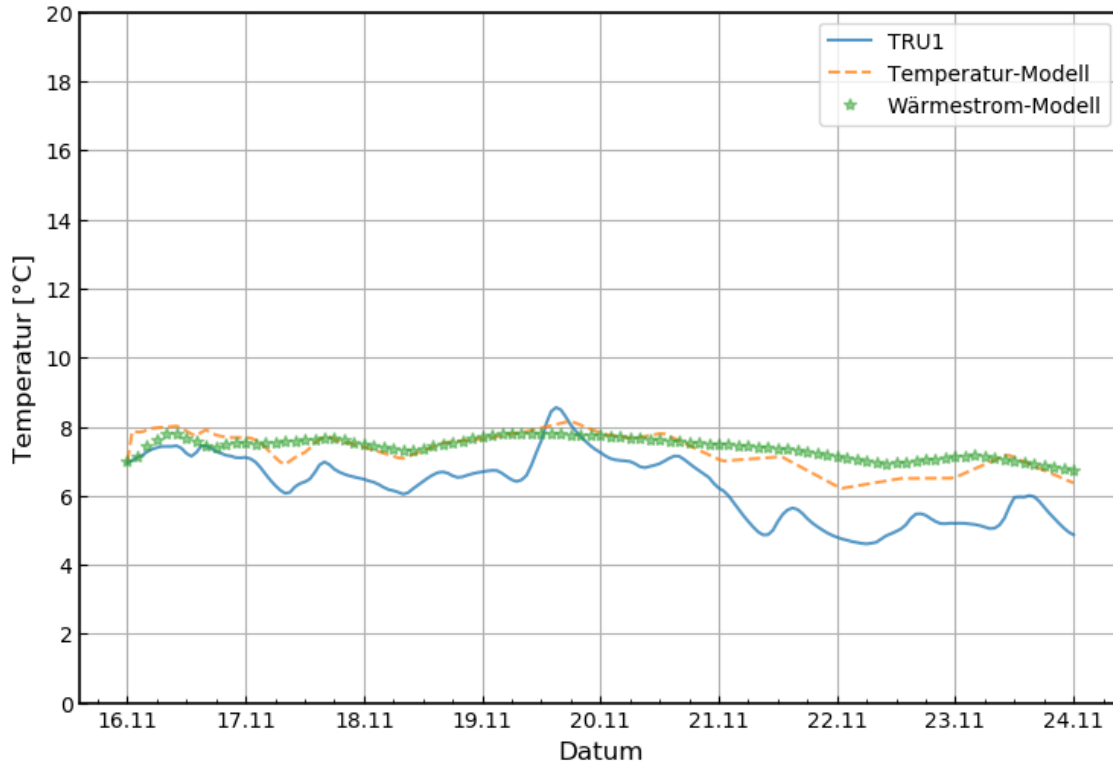


Abb. 4-5 Testfeld A1.1 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

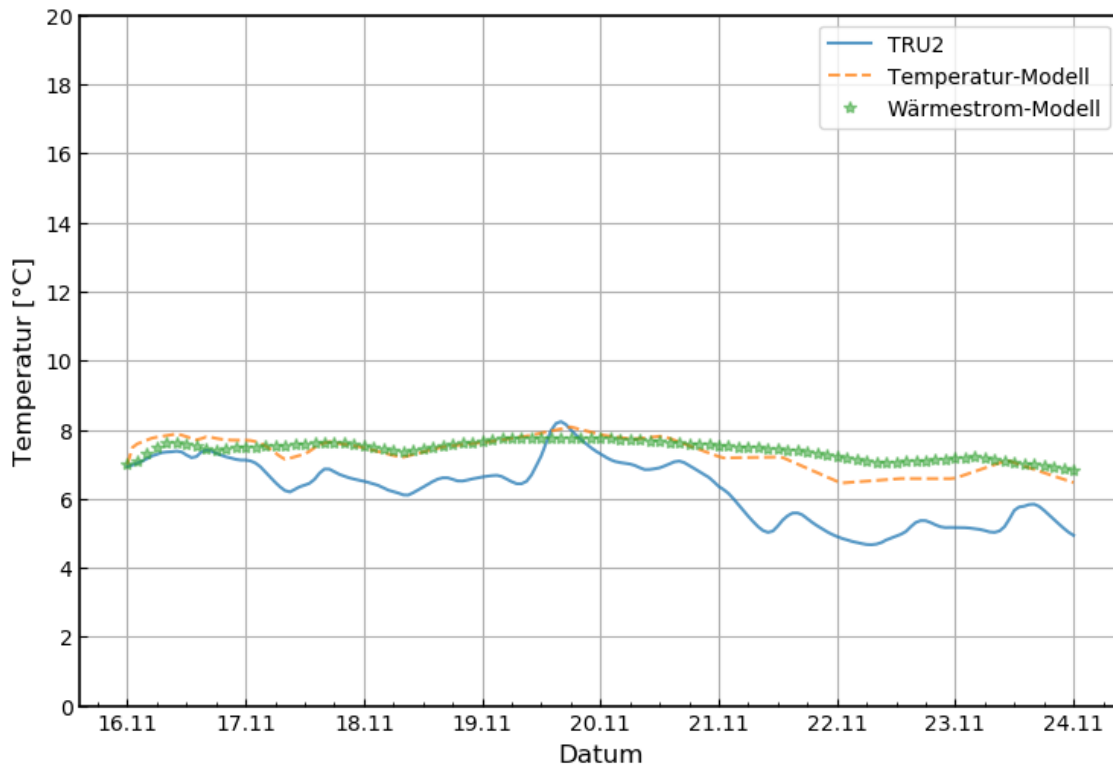


Abb. 4-6 Testfeld A1.1 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung



## 4.2 Testfeld A1.2

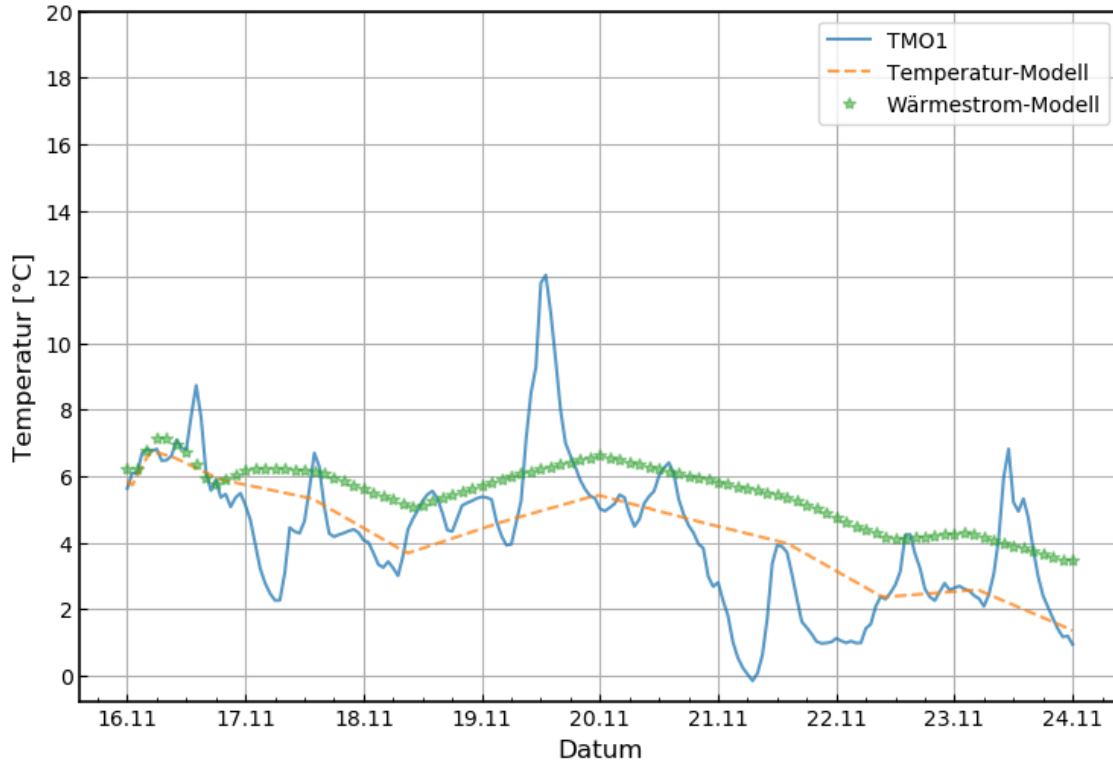


Abb. 4-7 Testfeld A1.2 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

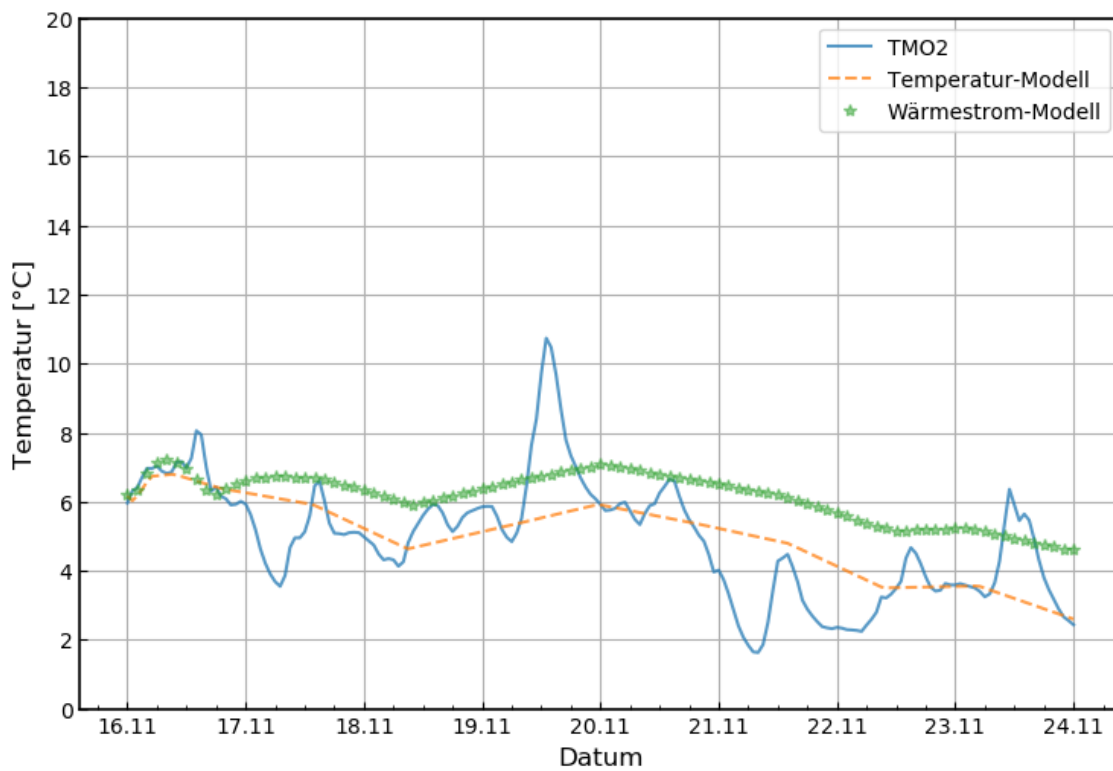


Abb. 4-8 Testfeld A1.2 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung

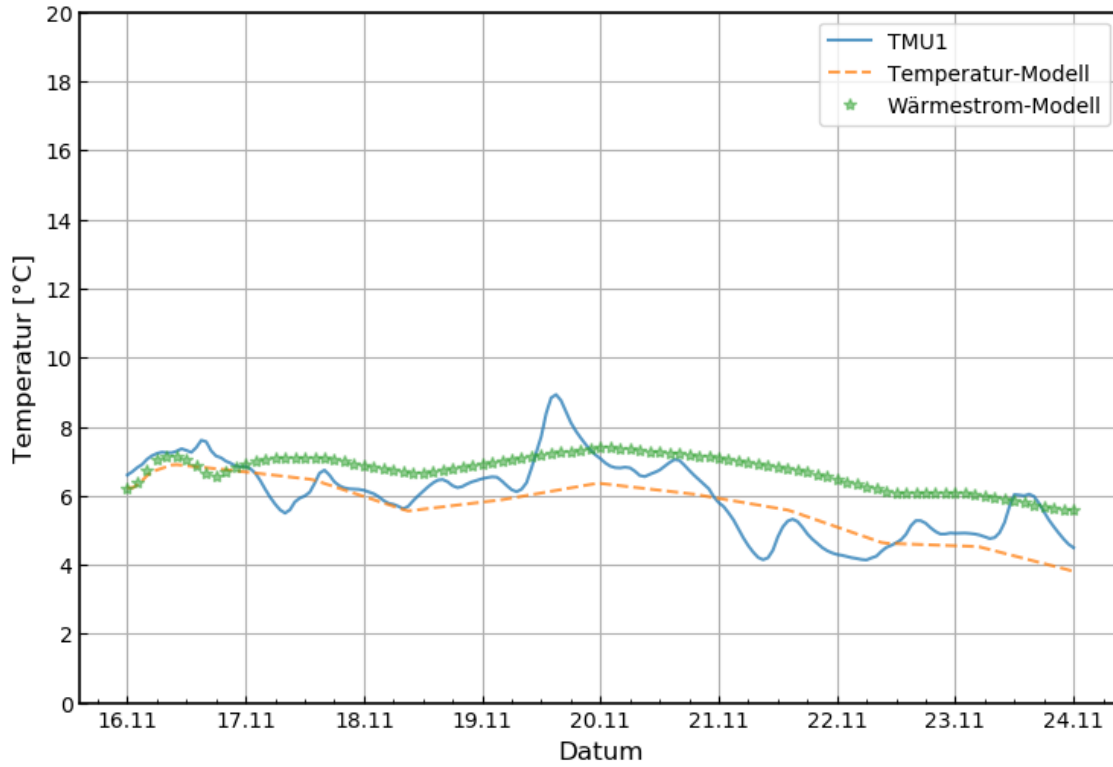


Abb. 4-9 Testfeld A1.2 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

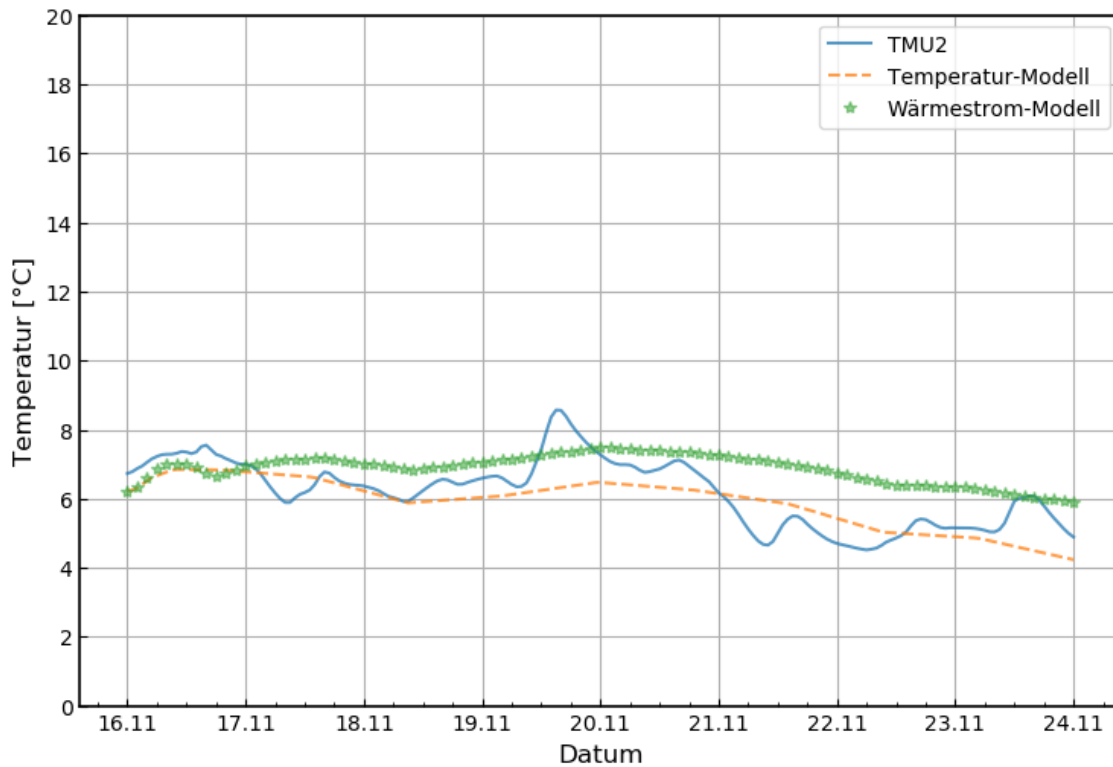


Abb. 4-10 Testfeld A1.2 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung



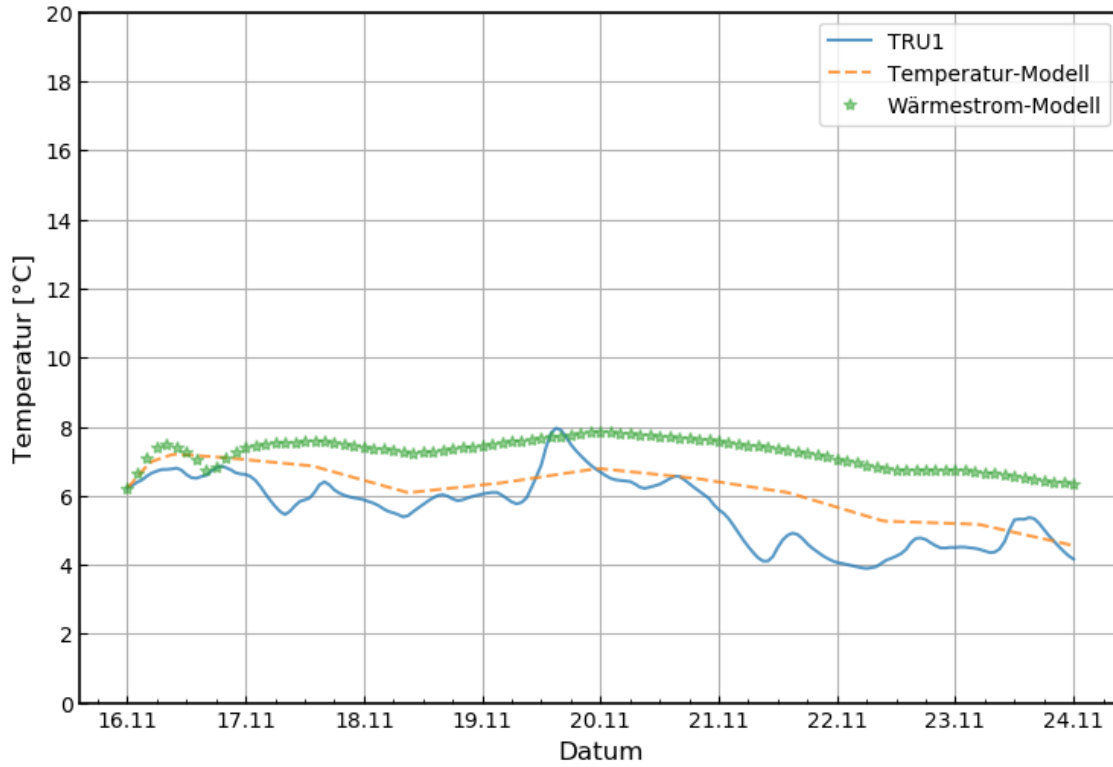


Abb. 4-11 Testfeld A1.2 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

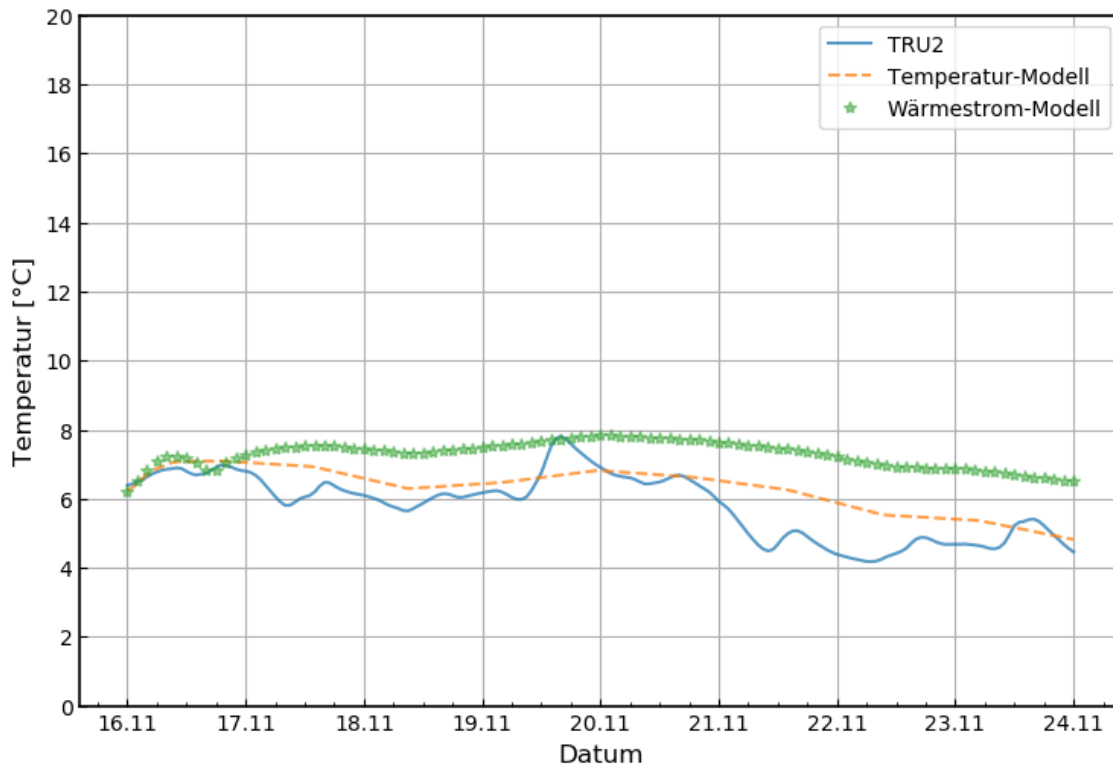


Abb. 4-12 Testfeld A1.2 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung

### 4.3 Testfeld A1.3

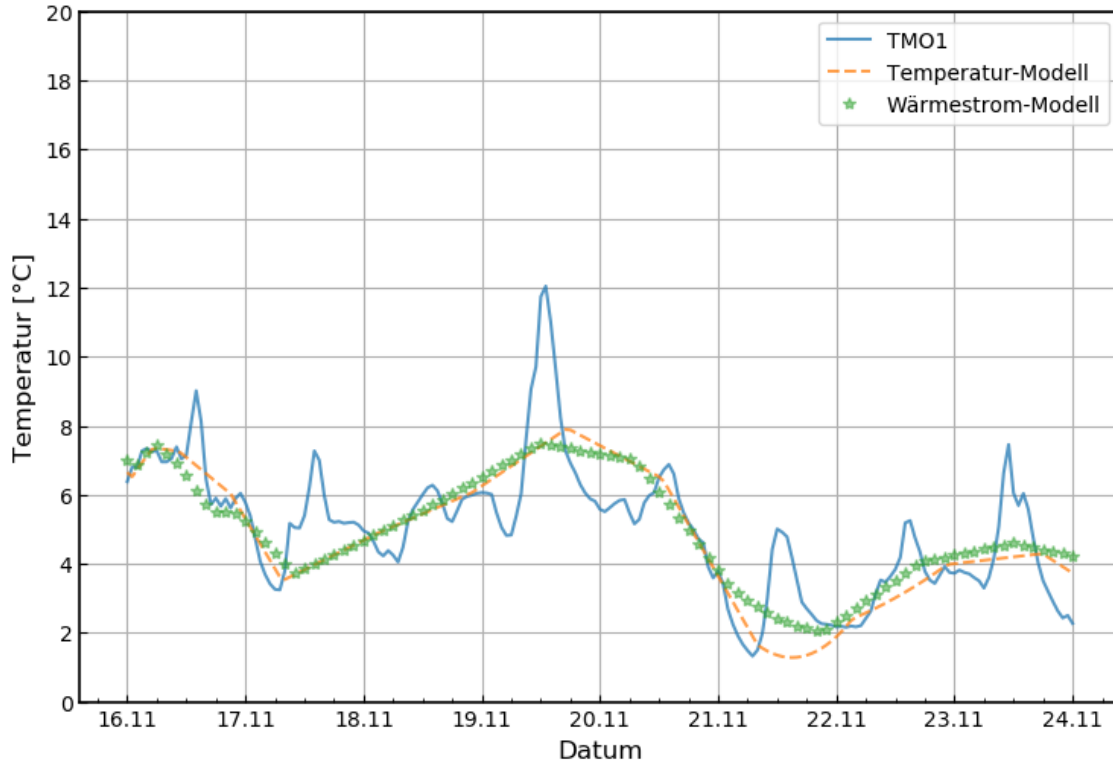


Abb. 4-13 Testfeld A1.3 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

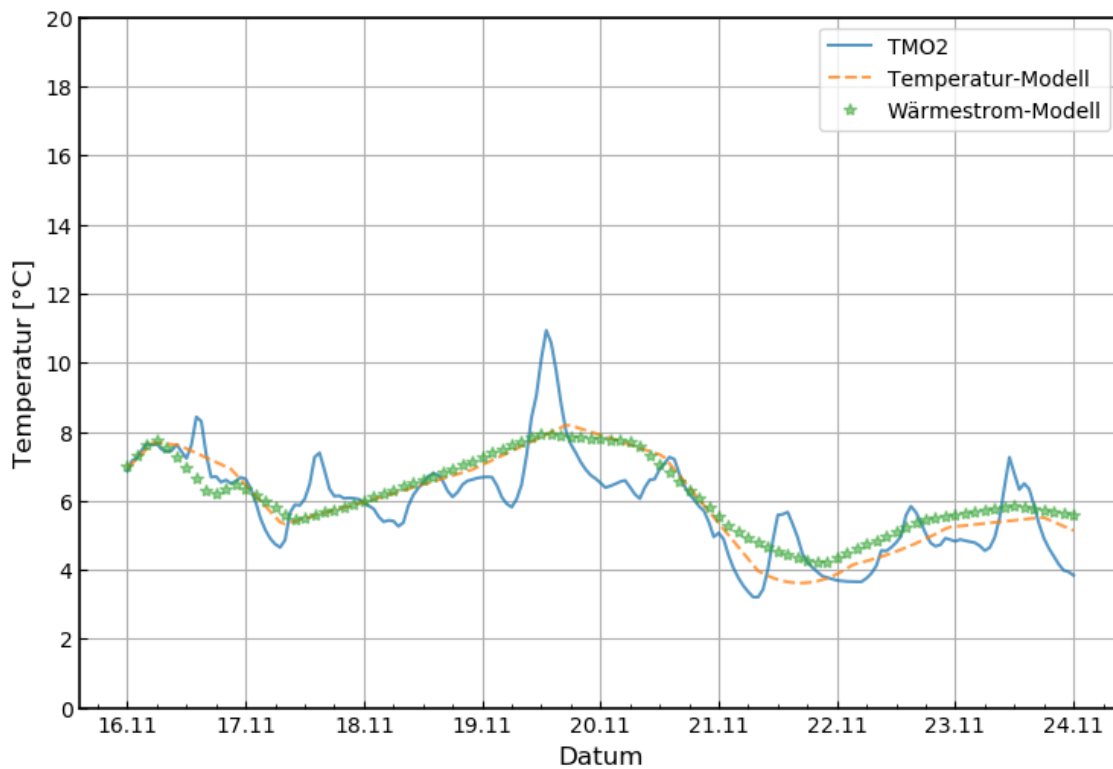


Abb. 4-14 Testfeld A1.3 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung

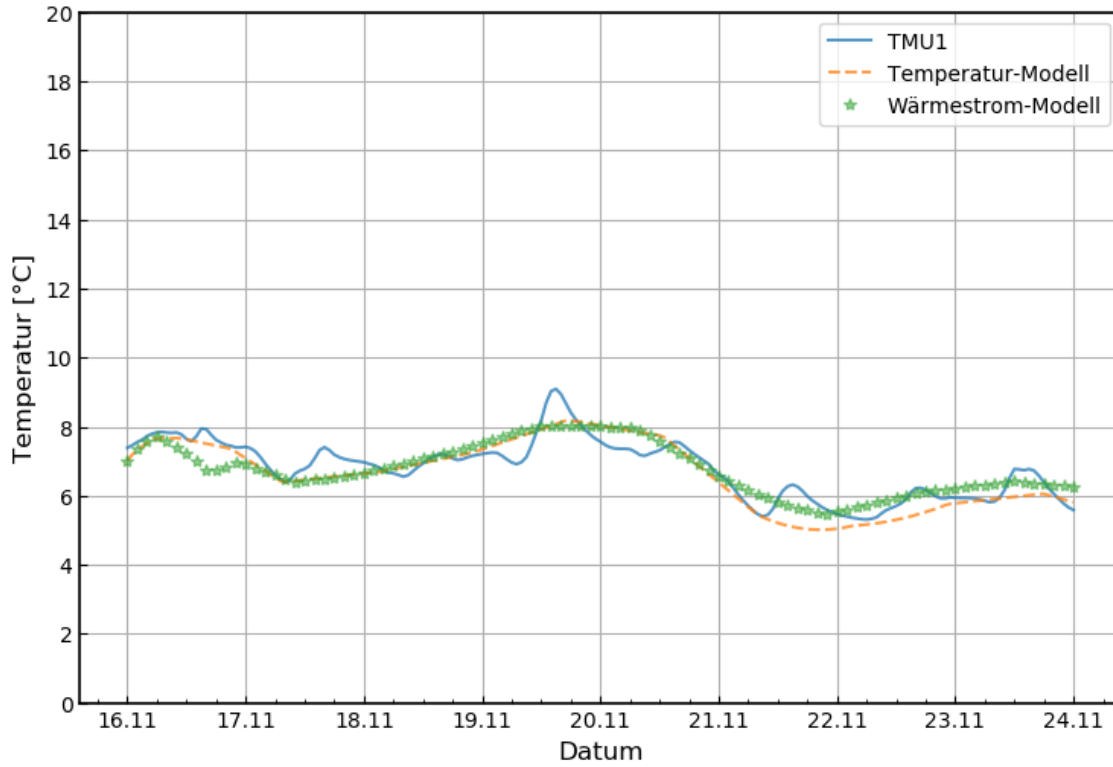


Abb. 4-15 Testfeld A1.3 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

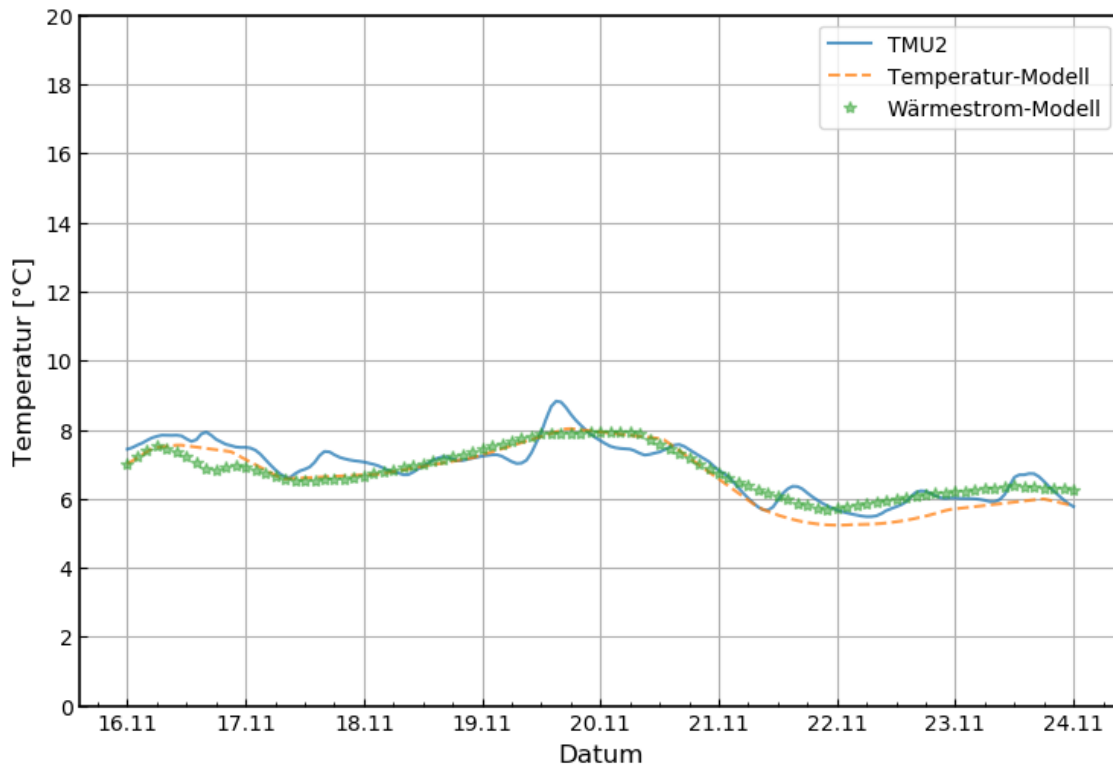


Abb. 4-16 Testfeld A1.3 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung

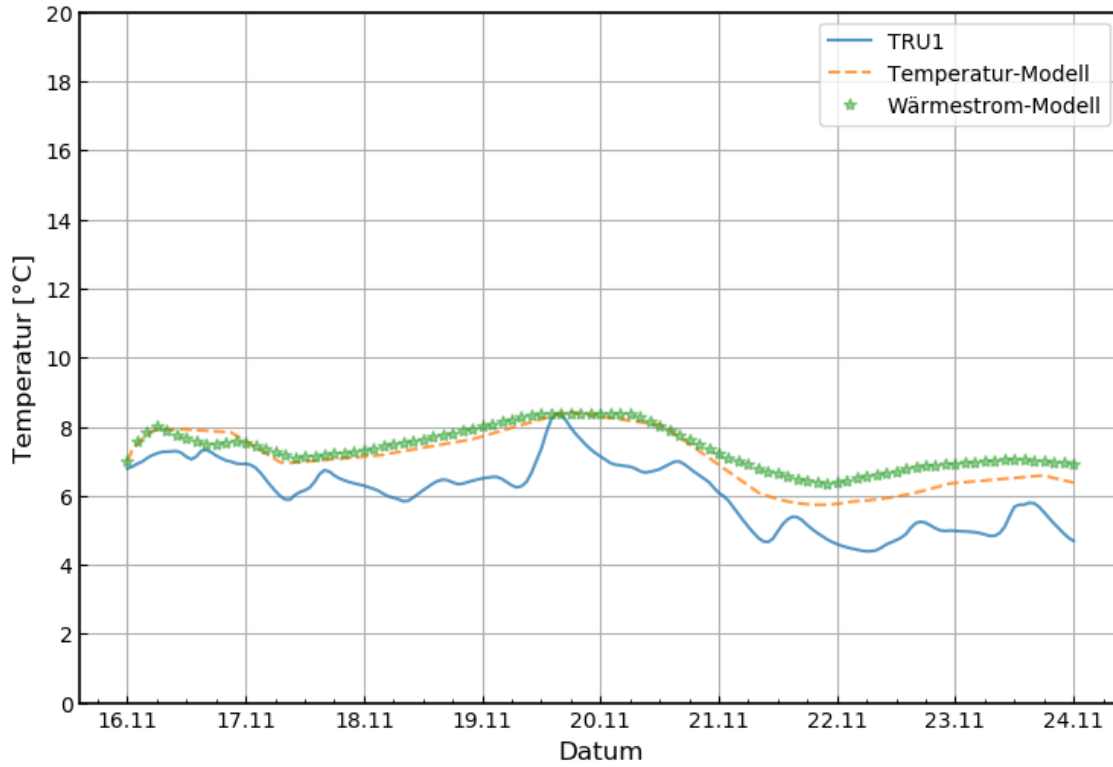


Abb. 4-17 Testfeld A1.3 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

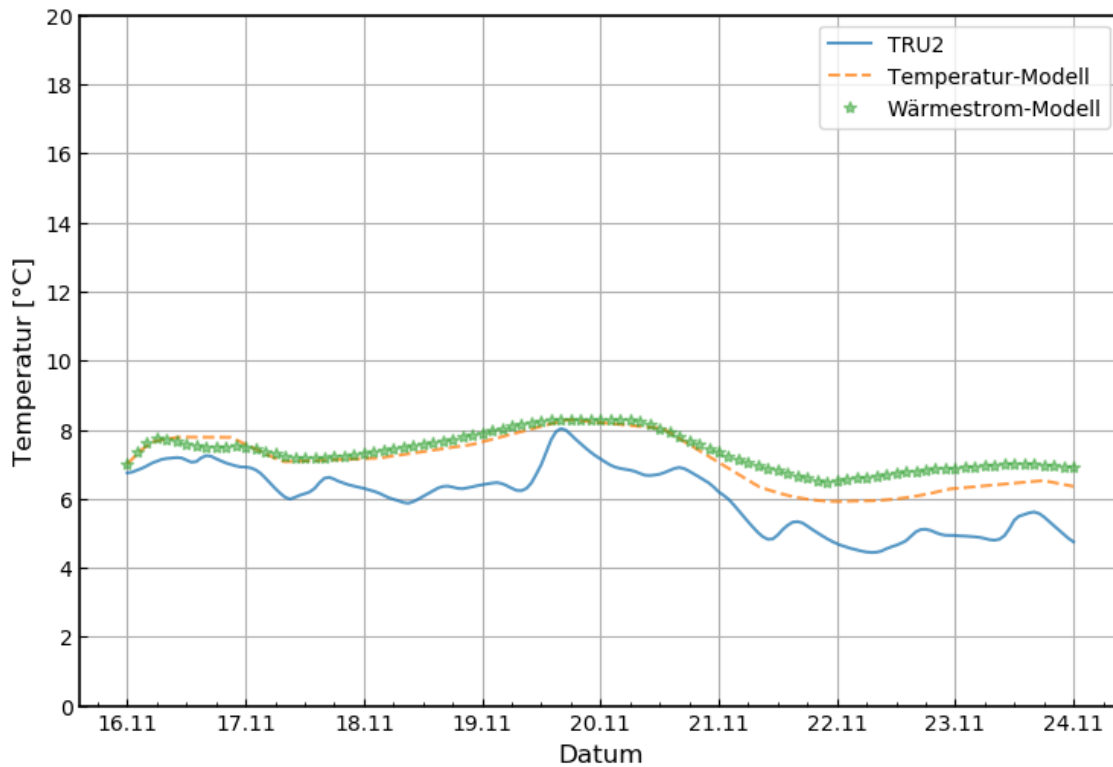


Abb. 4-18 Testfeld A1.3 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung

#### 4.4 Testfeld A1.4

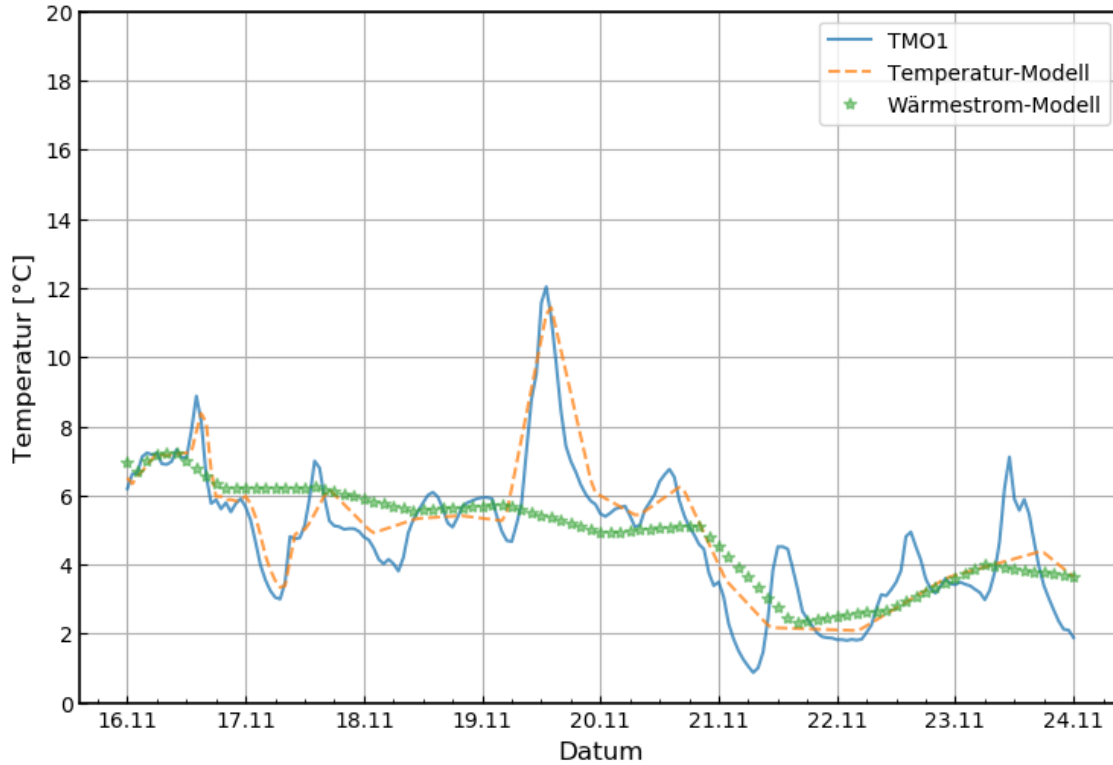


Abb. 4-19 Testfeld A1.4 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

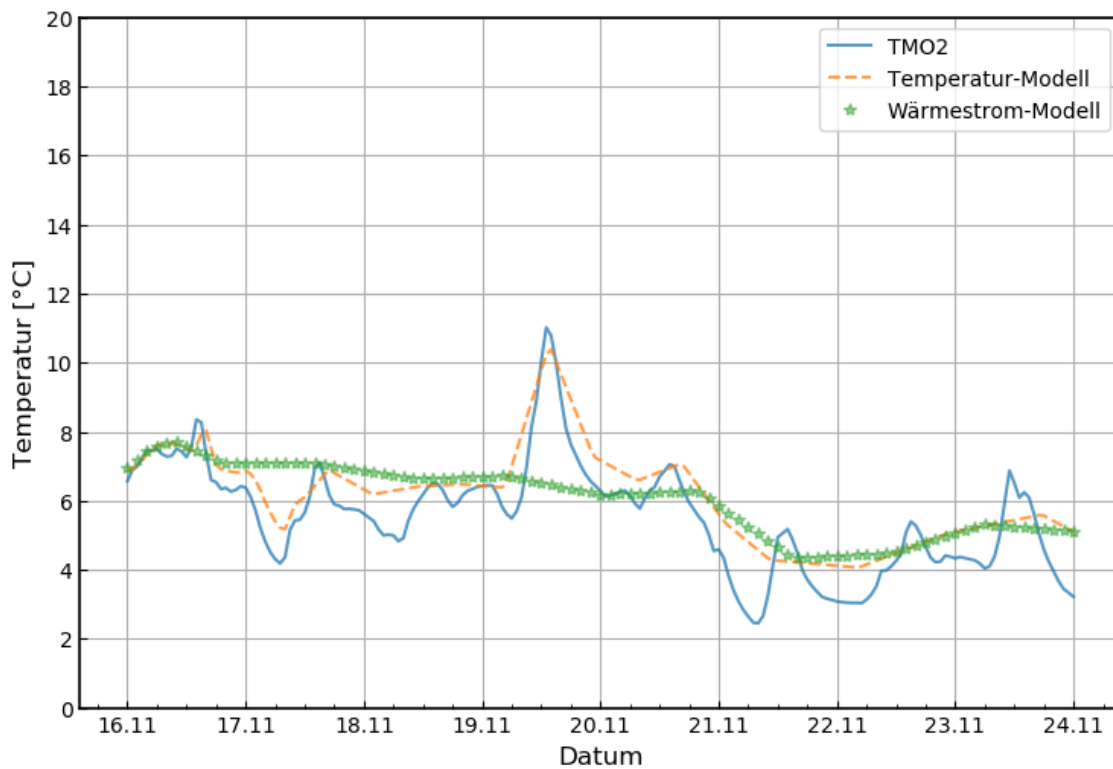


Abb. 4-20 Testfeld A1.4 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung

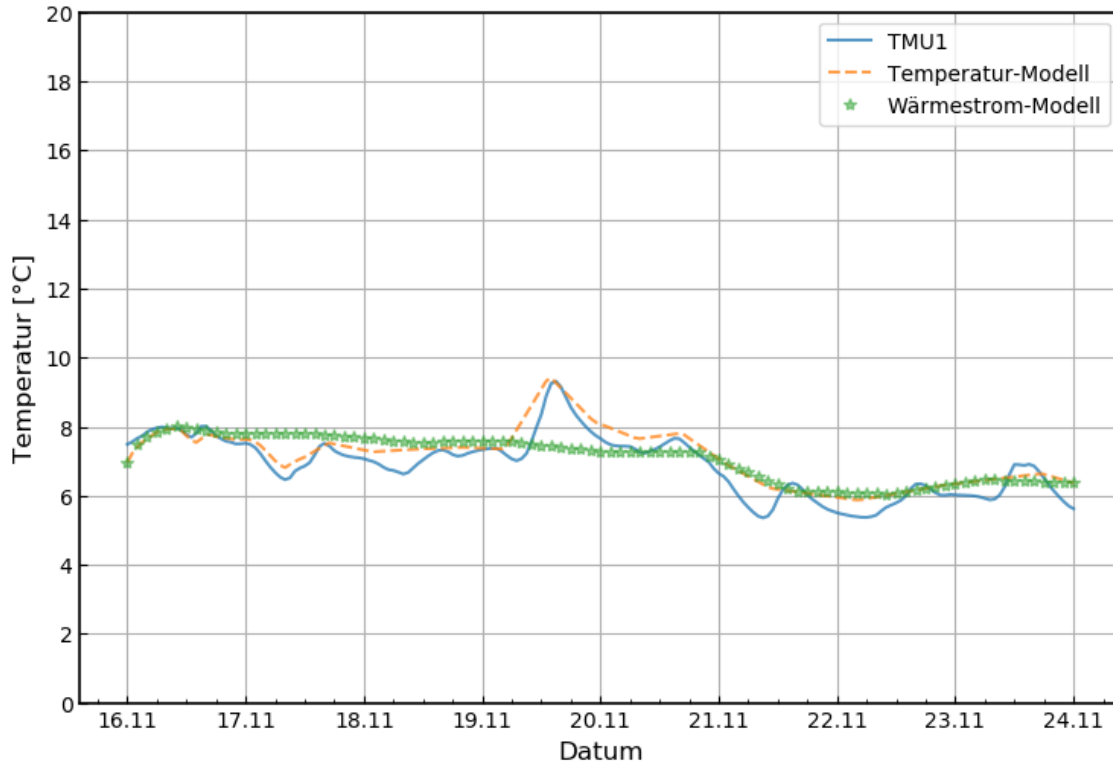


Abb. 4-21 Testfeld A1.4 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

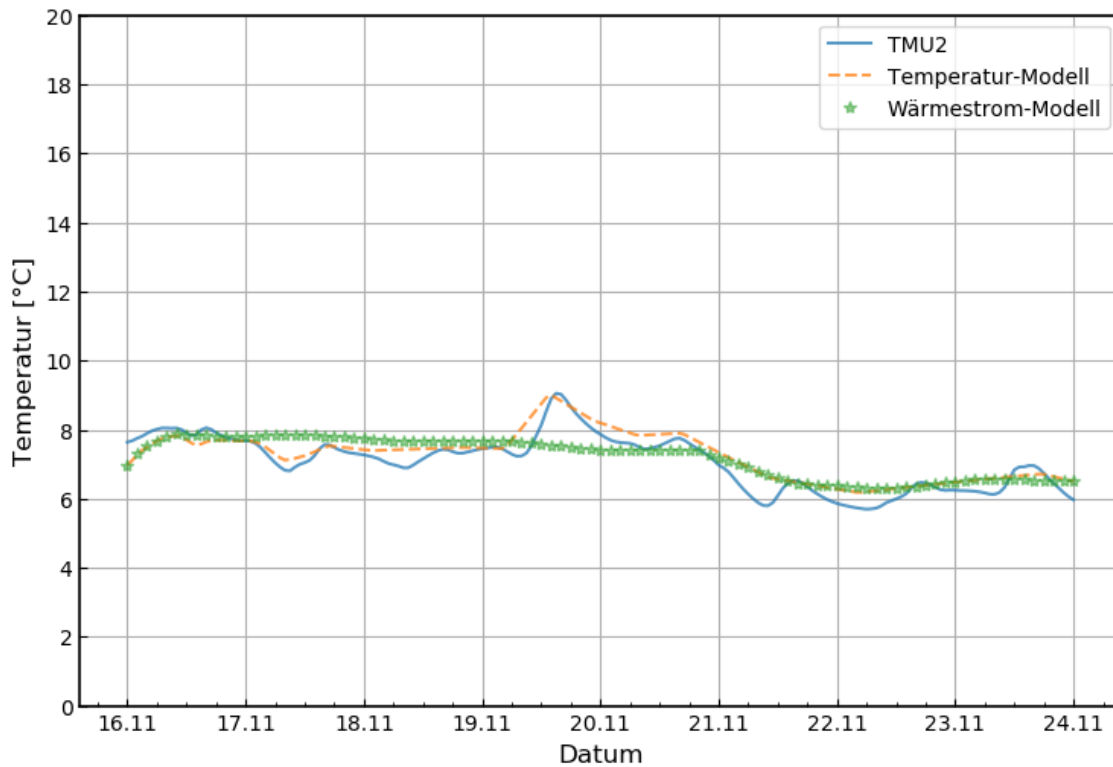


Abb. 4-22 Testfeld A1.4 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung

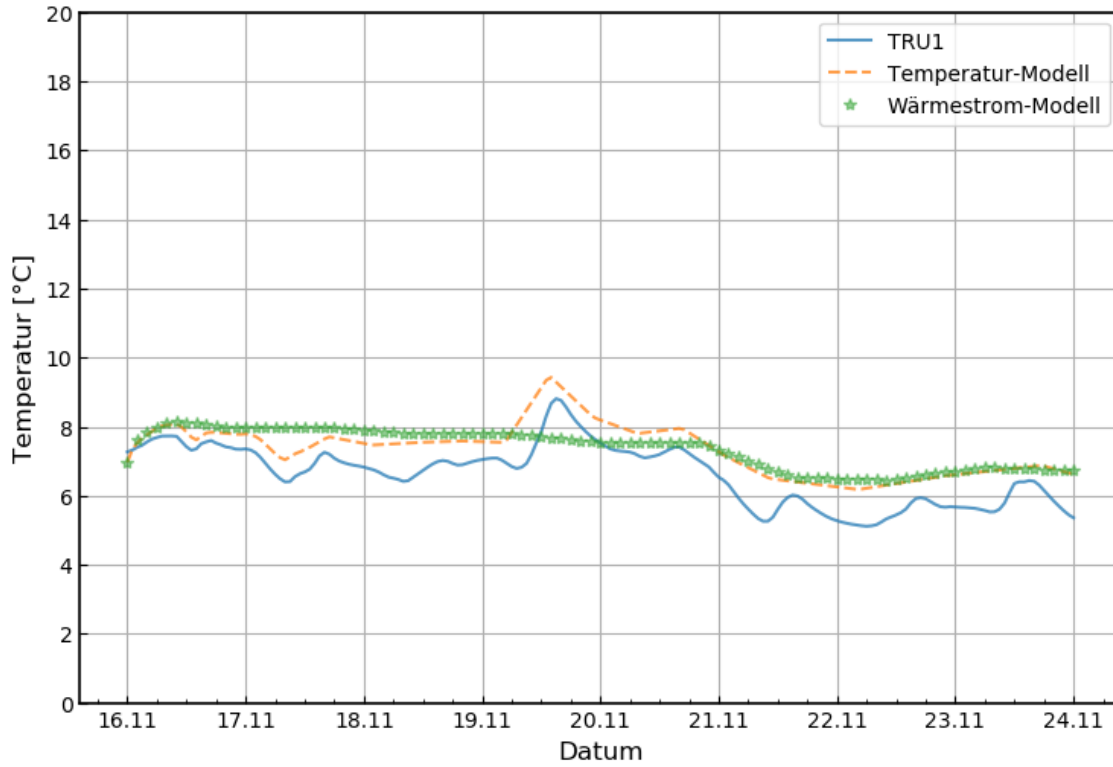


Abb. 4-23 Testfeld A1.4 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

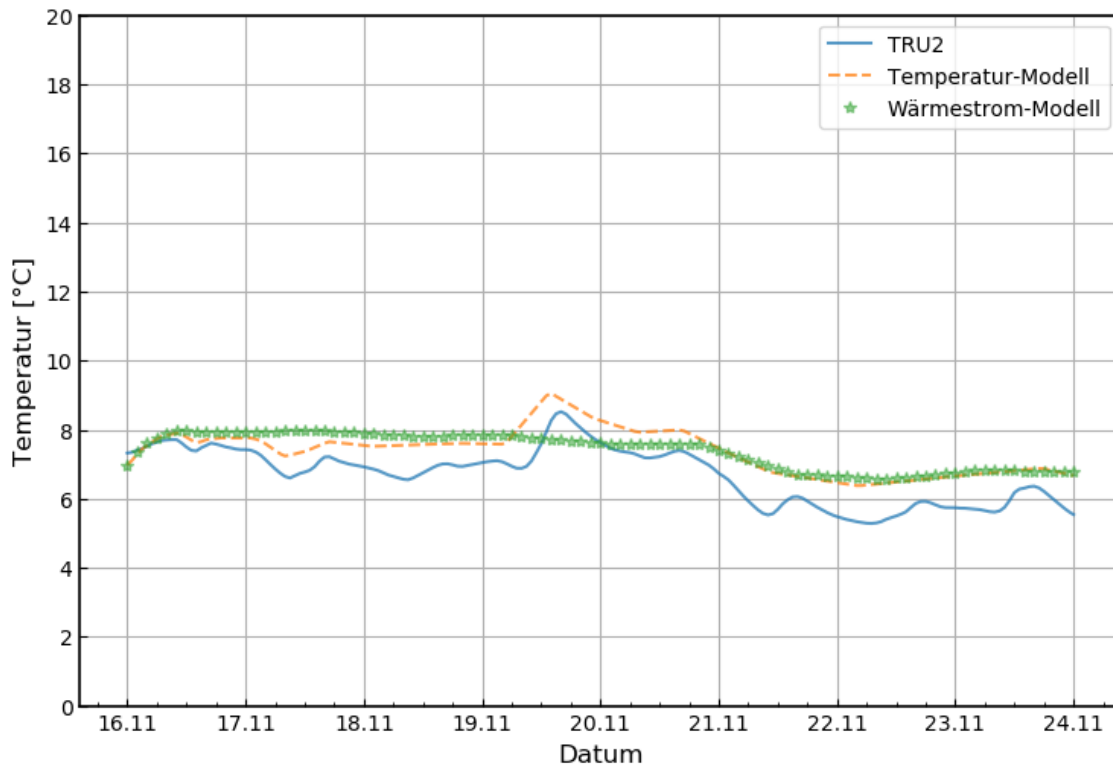


Abb. 4-24 Testfeld A1.4 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung

#### 4.5 Testfeld A1.5

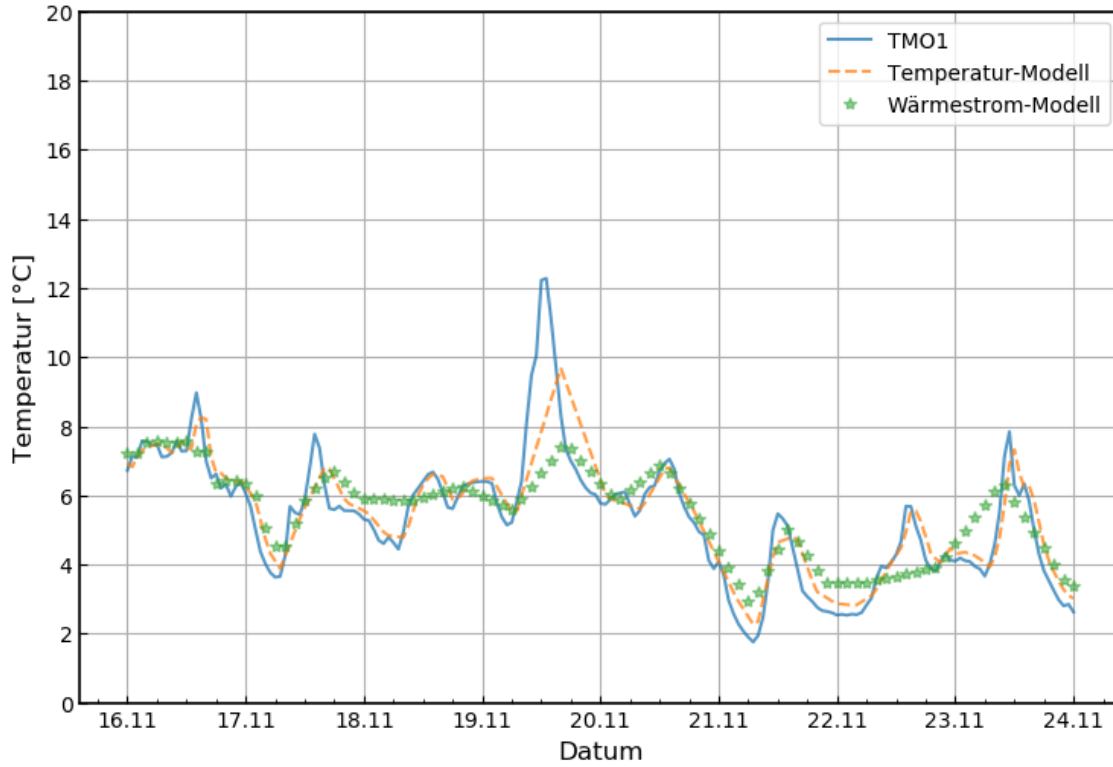


Abb. 4-25 Testfeld A1.5 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

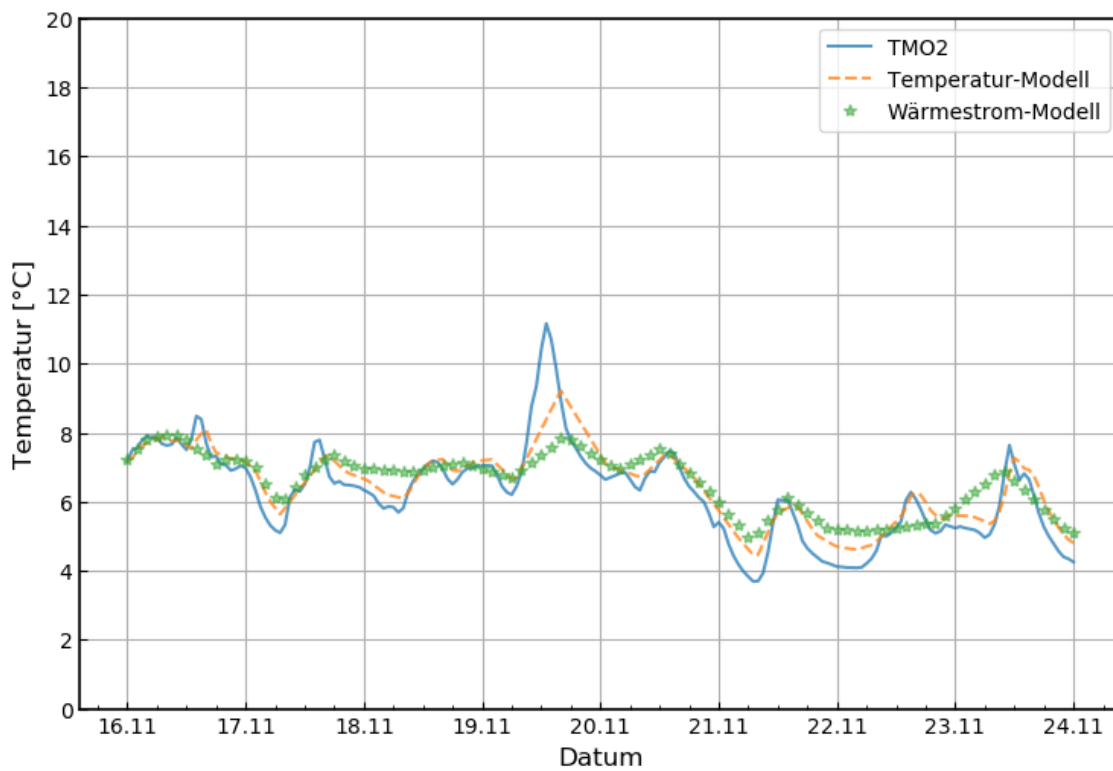


Abb. 4-26 Testfeld A1.5 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung



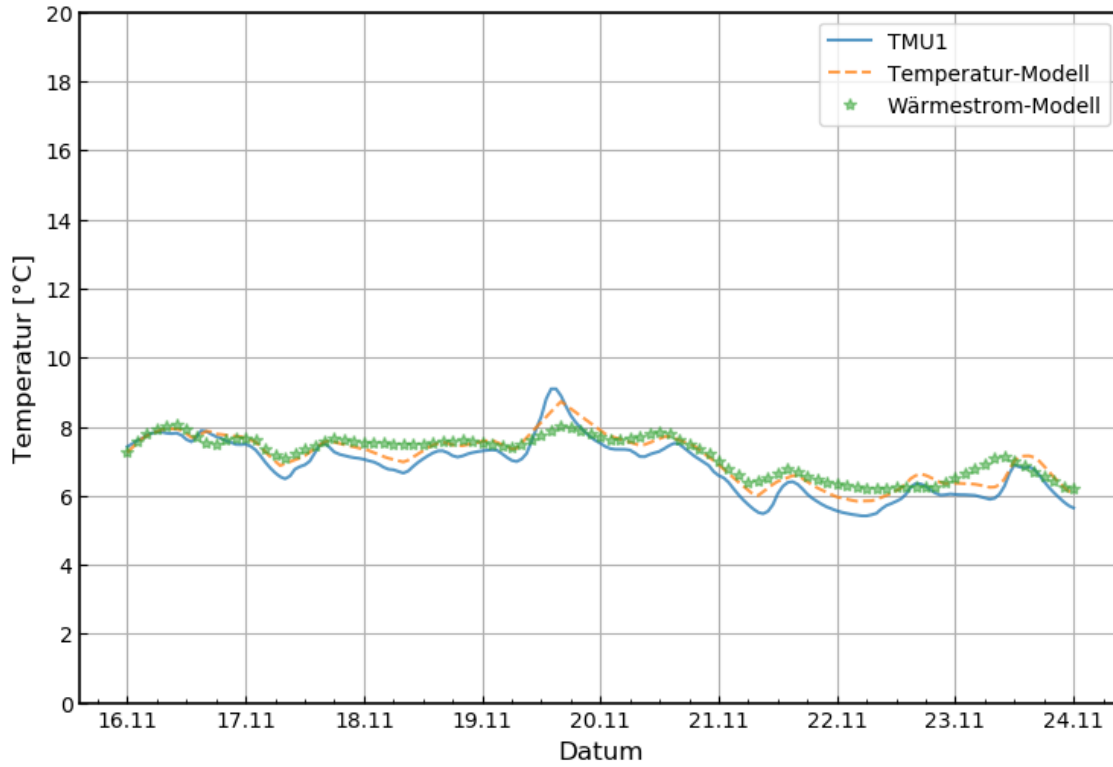


Abb. 4-27 Testfeld A1.5 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

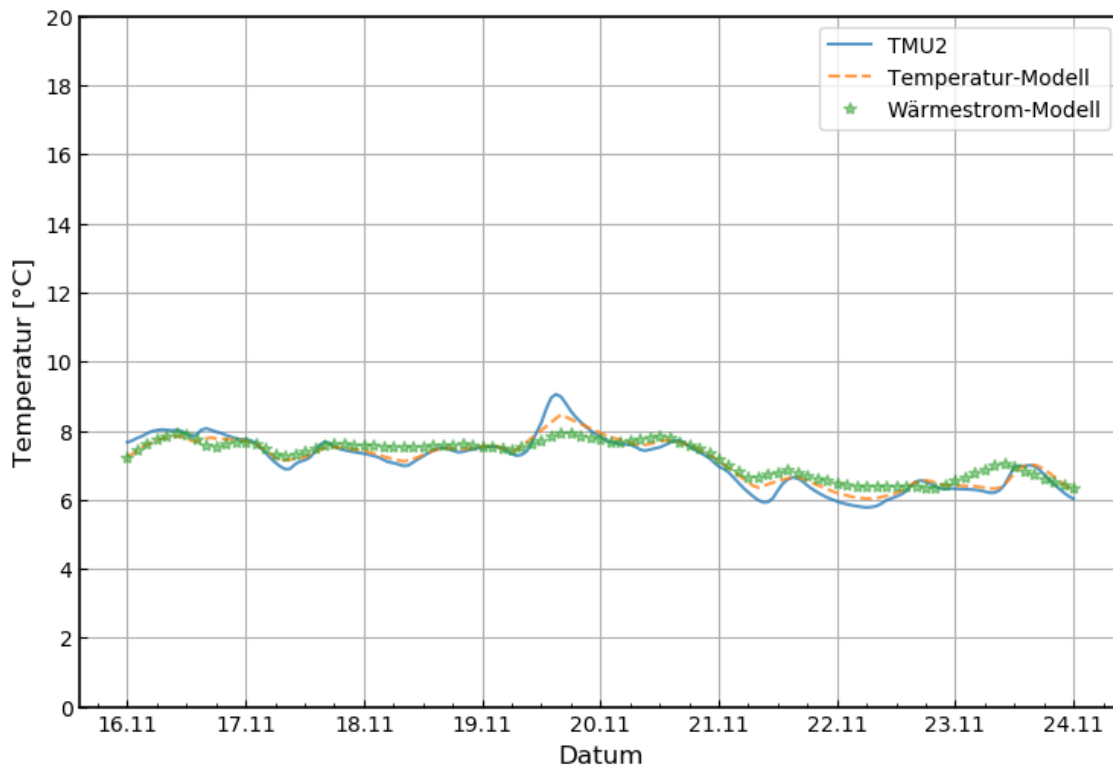


Abb. 4-28 Testfeld A1.5 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung

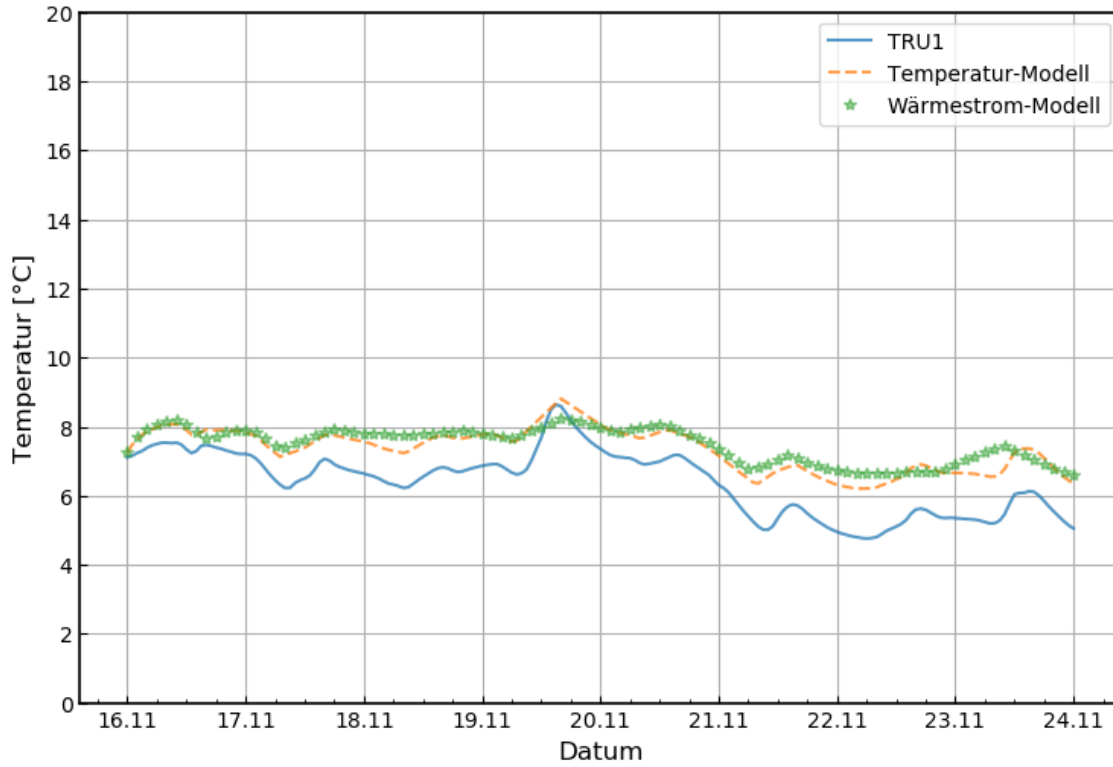


Abb. 4-29 Testfeld A1.5 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

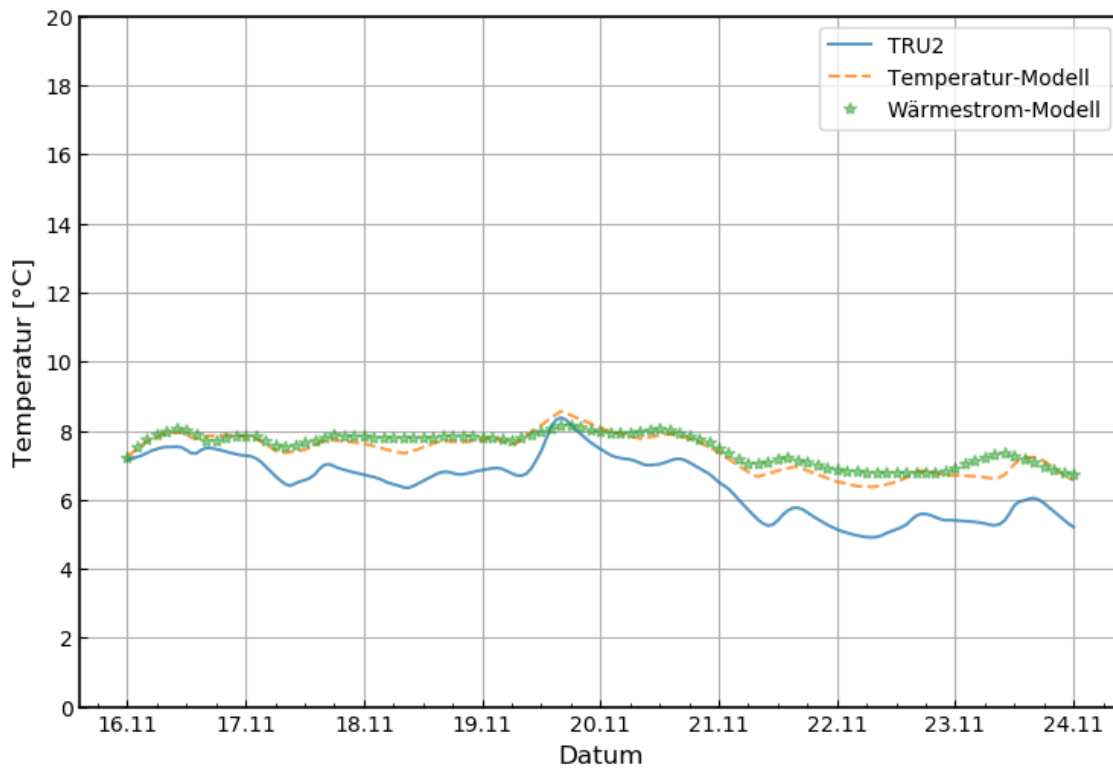


Abb. 4-30 Testfeld A1.5 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung

#### 4.6 Testfeld B1.1

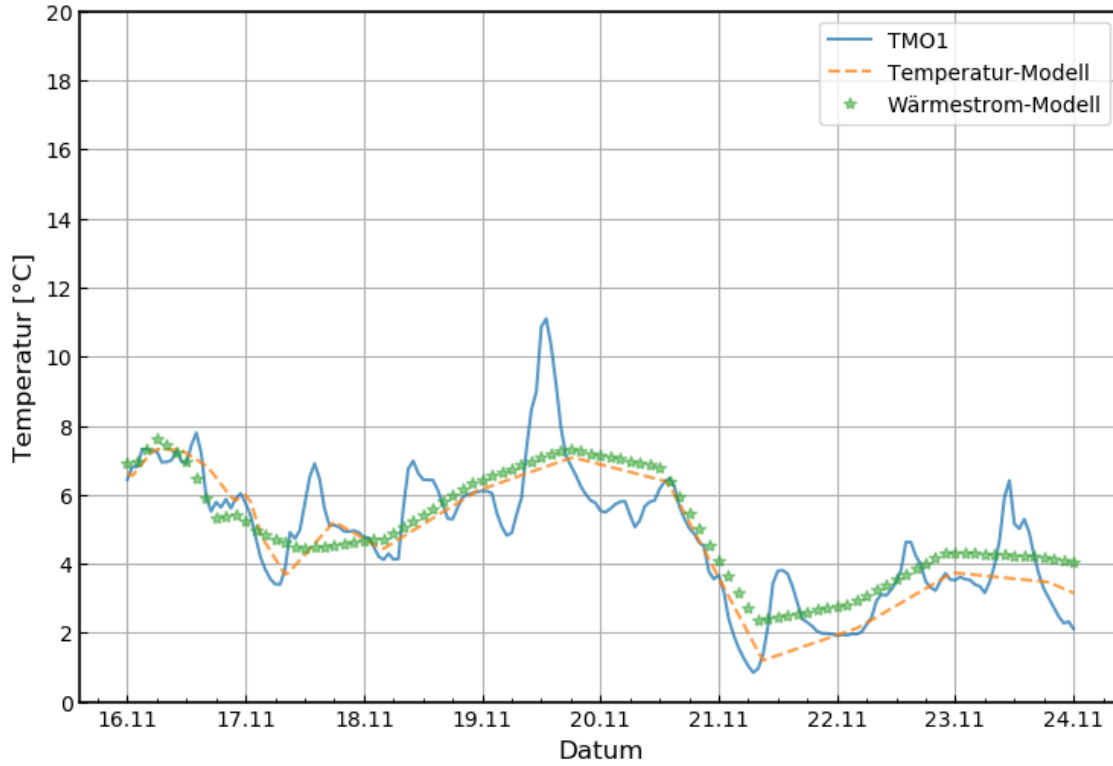


Abb. 4-31 Testfeld B1.1 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

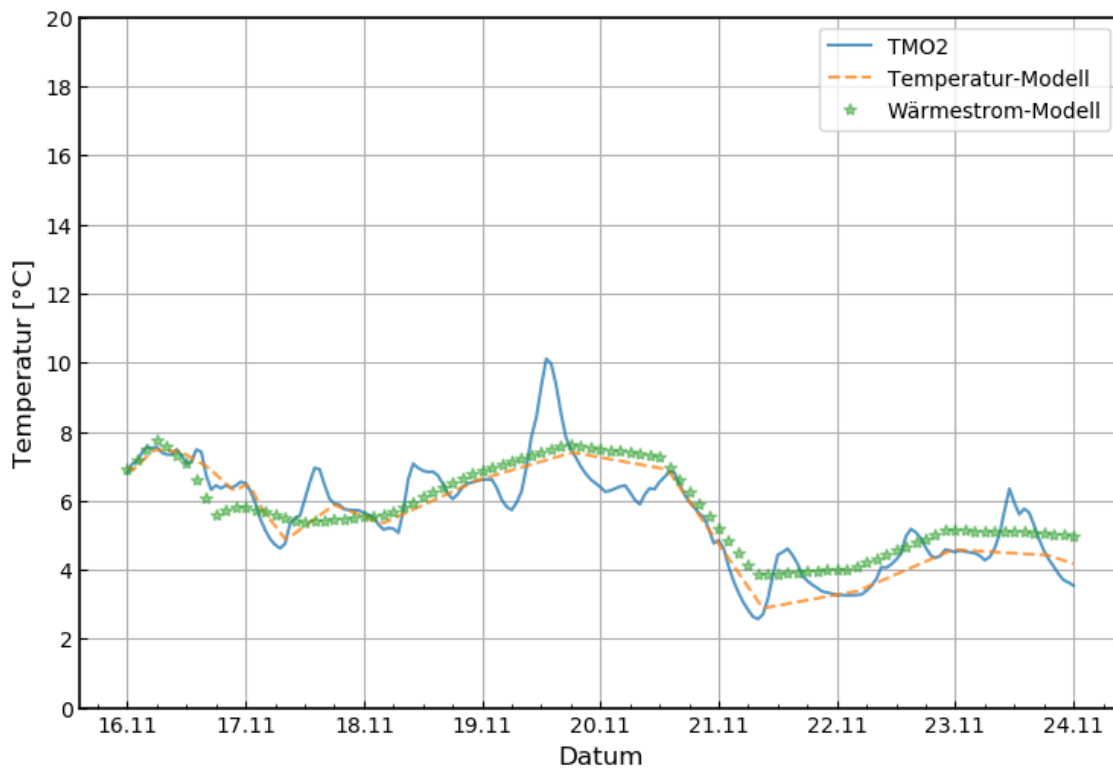


Abb. 4-32 Testfeld B1.1 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung

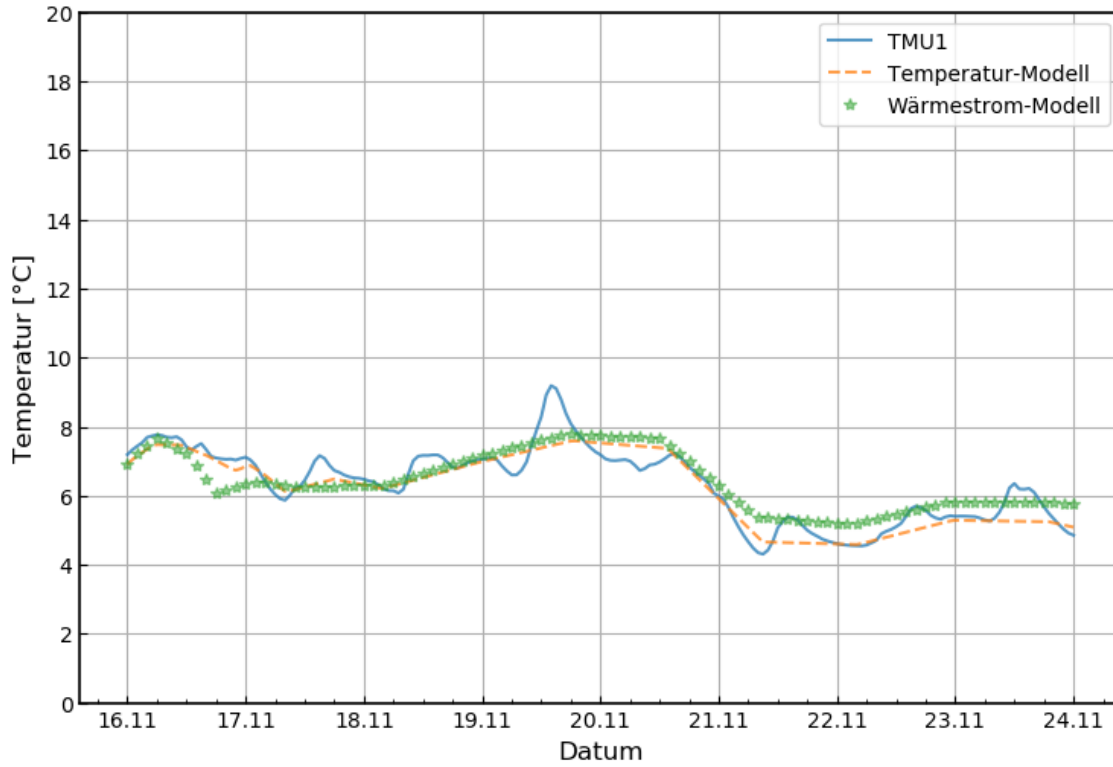


Abb. 4-33 Testfeld B1.1 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

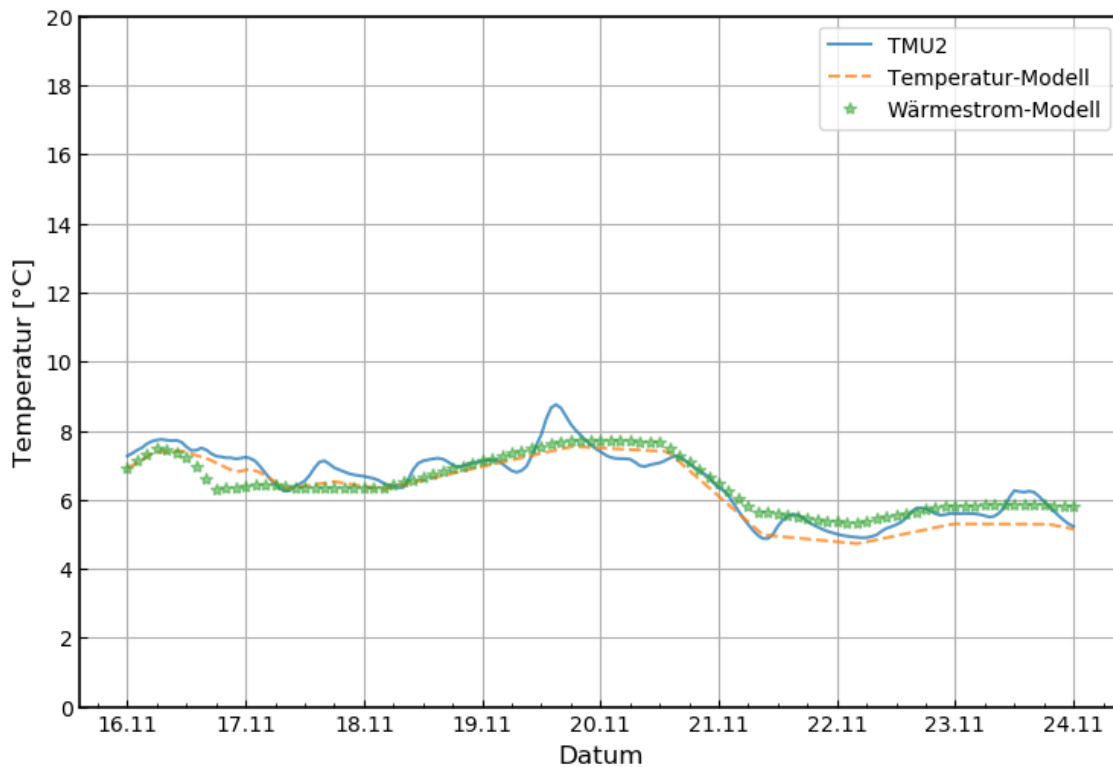


Abb. 4-34 Testfeld B1.1 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung

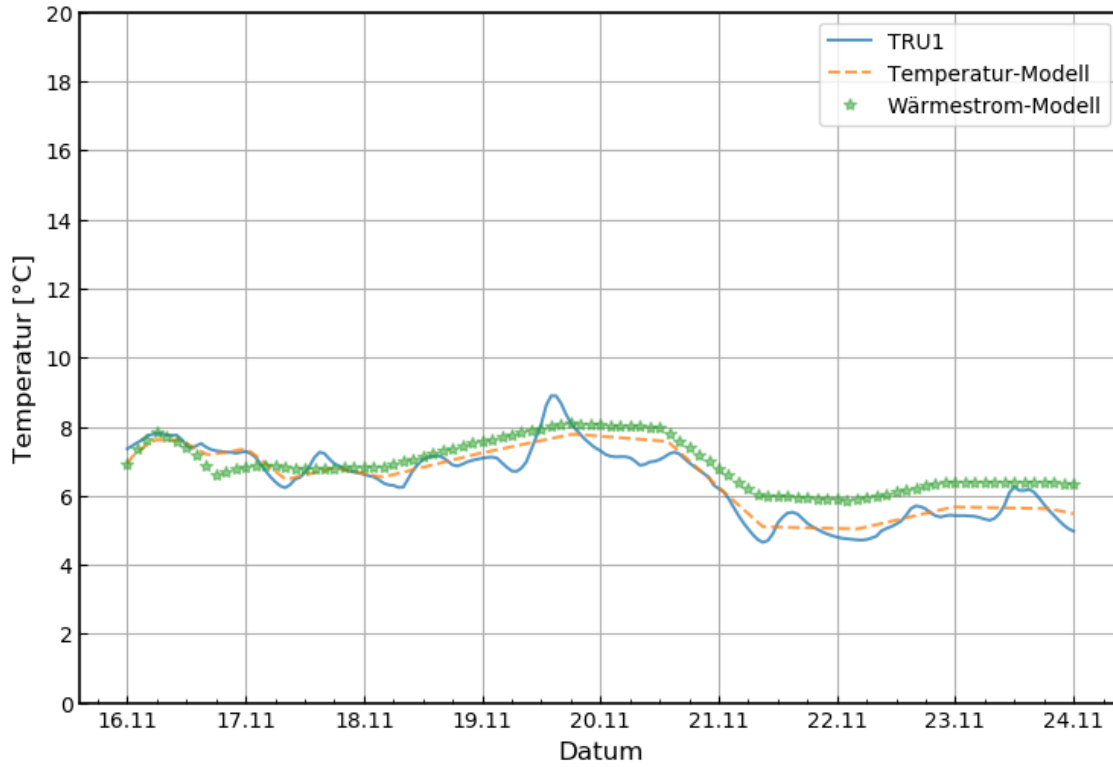


Abb. 4-35 Testfeld B1.1 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

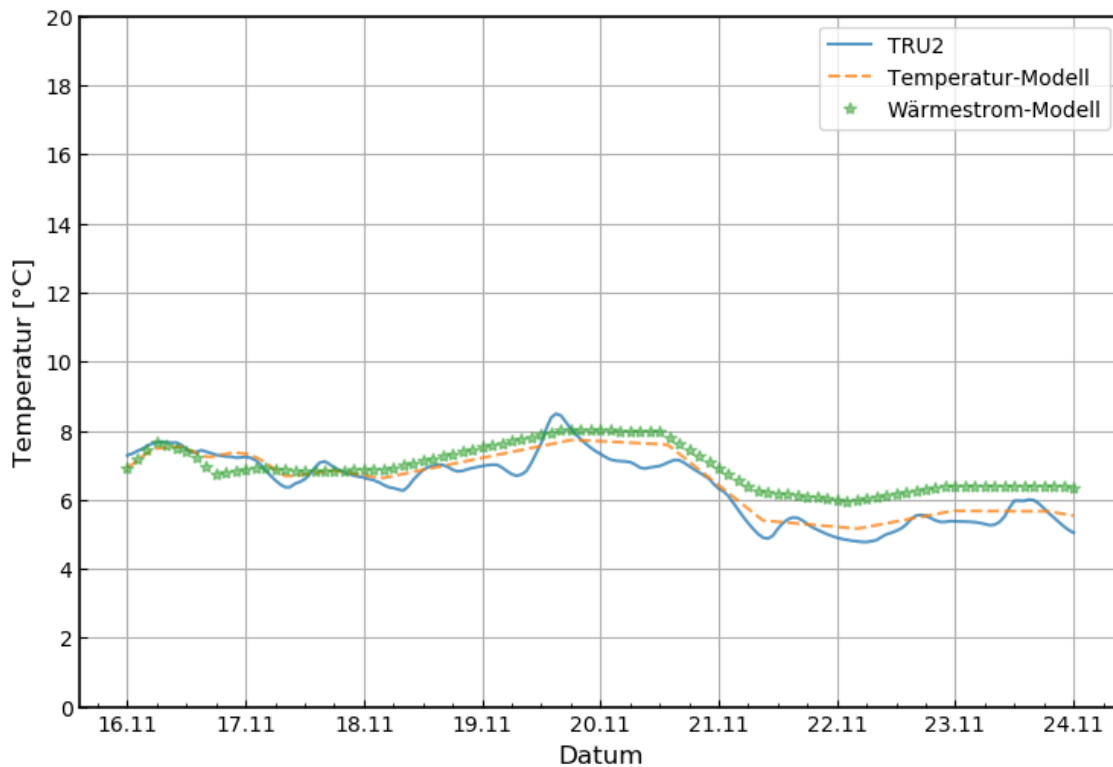


Abb. 4-36 Testfeld B1.1 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung



#### 4.7 Testfeld B1.2

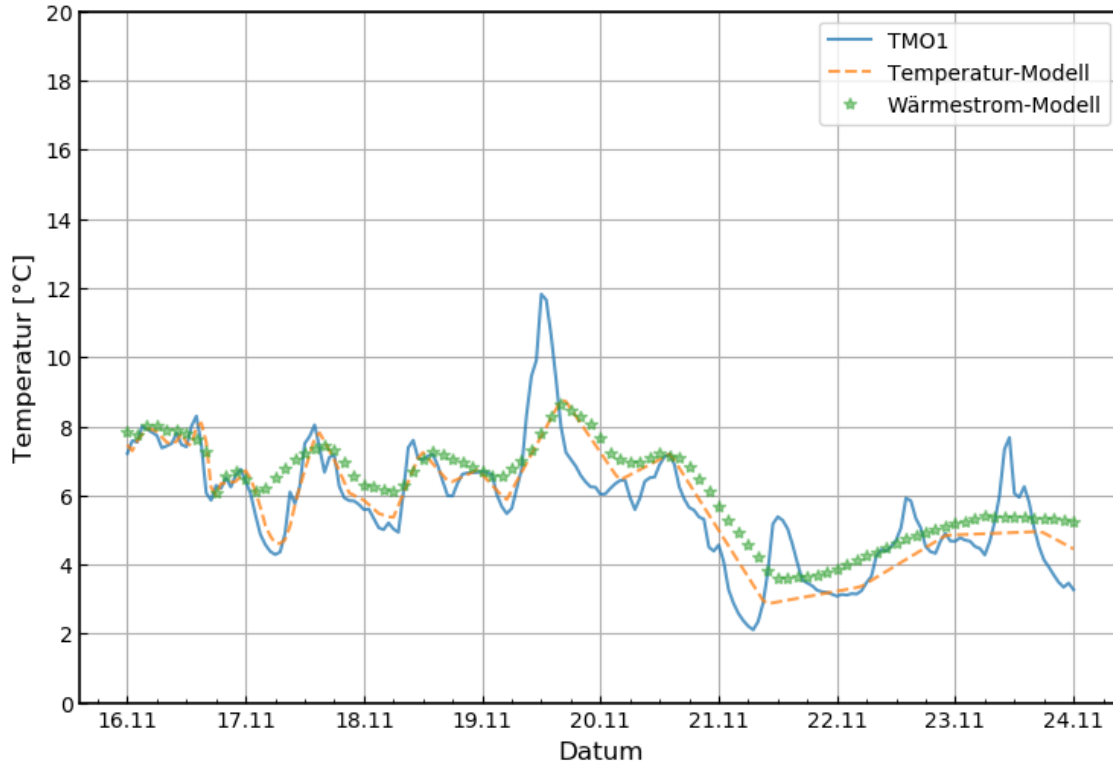


Abb. 4-37 Testfeld B1.2 – Sensor TMO1 - Validierung turbulente Durchströmung

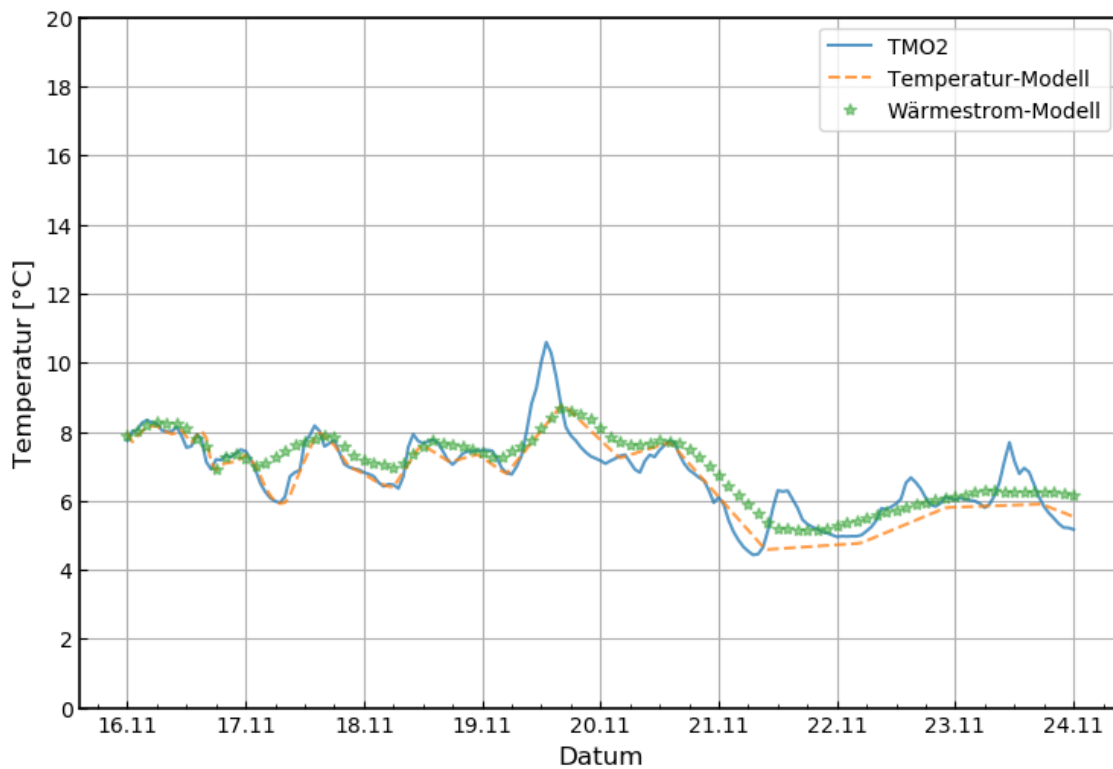


Abb. 4-38 Testfeld B1.2 – Sensor TMO2 - Validierung turbulente Durchströmung

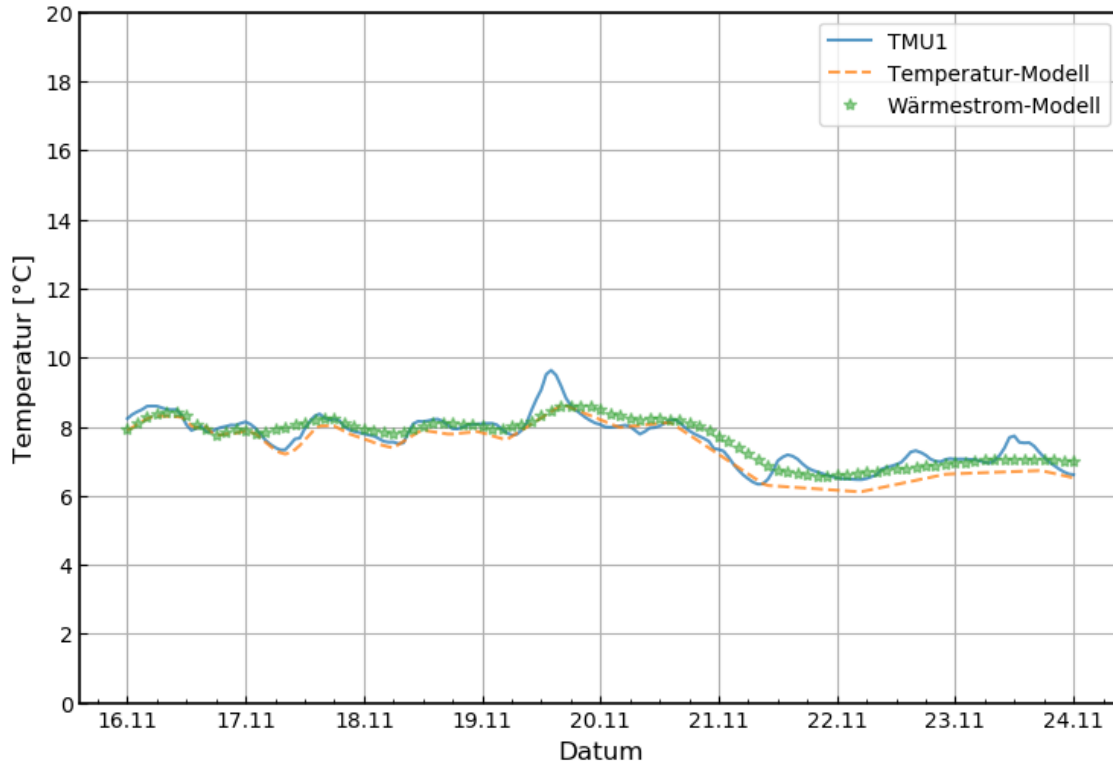


Abb. 4-39 Testfeld B1.2 – Sensor TMU1 - Validierung turbulente Durchströmung

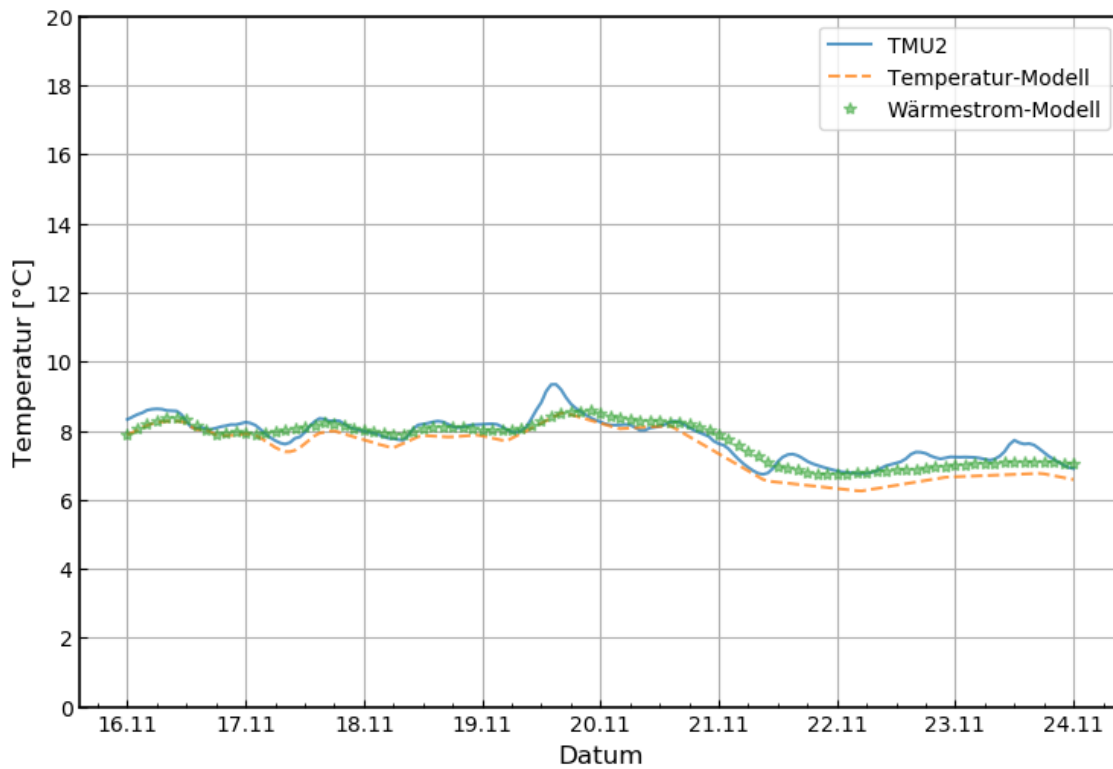


Abb. 4-40 Testfeld B1.2 – Sensor TMU2 - Validierung turbulente Durchströmung

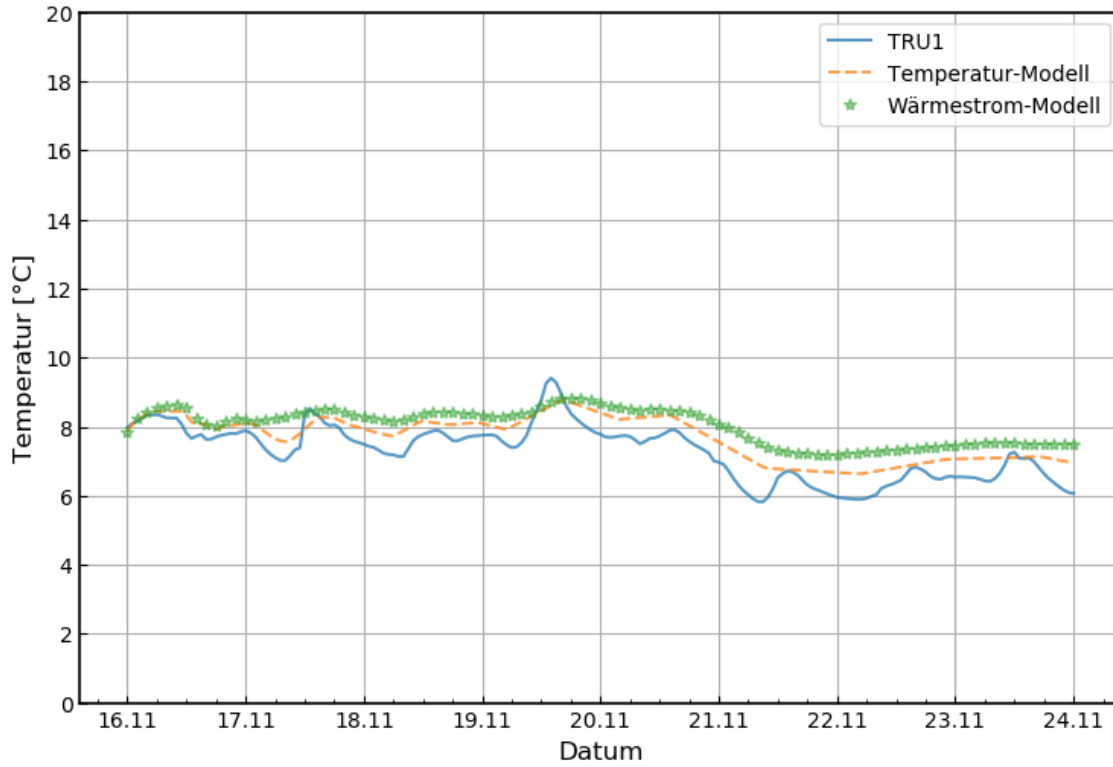


Abb. 4-41 Testfeld B1.2 – Sensor TRU1 - Validierung turbulente Durchströmung

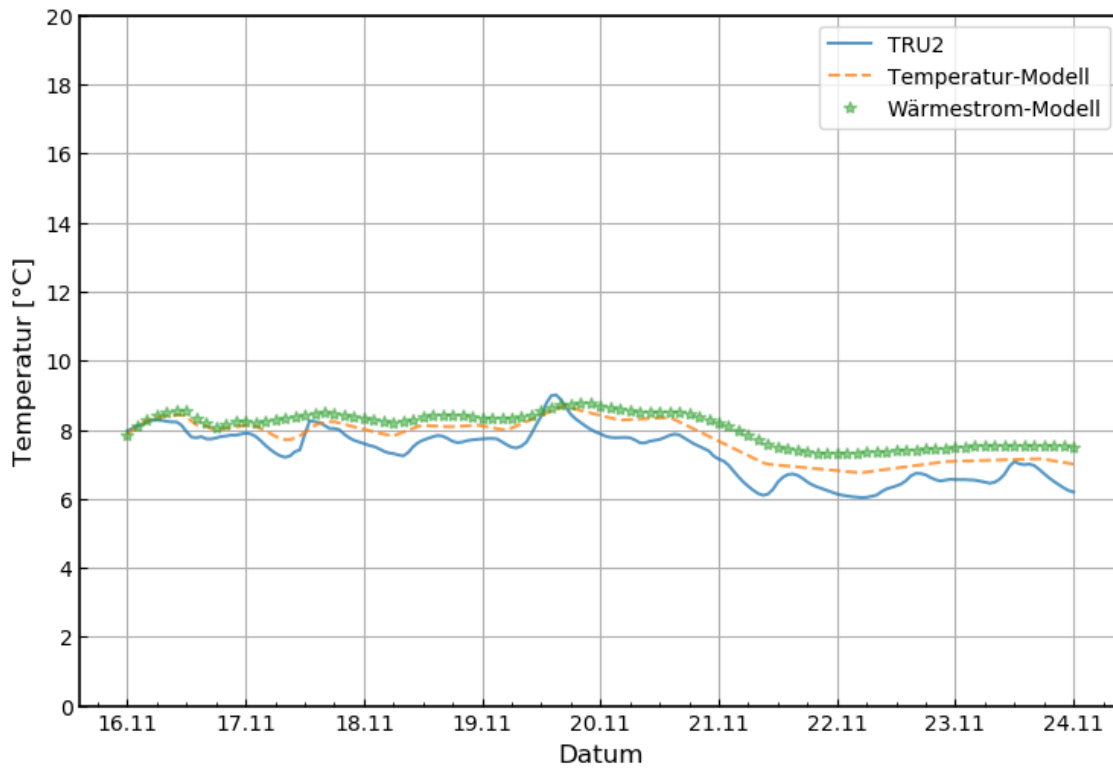


Abb. 4-42 Testfeld B1.2 – Sensor TRU2 - Validierung turbulente Durchströmung





## 5 Hochturbulente Durchströmung

### 5.1 Testfeld A1.1

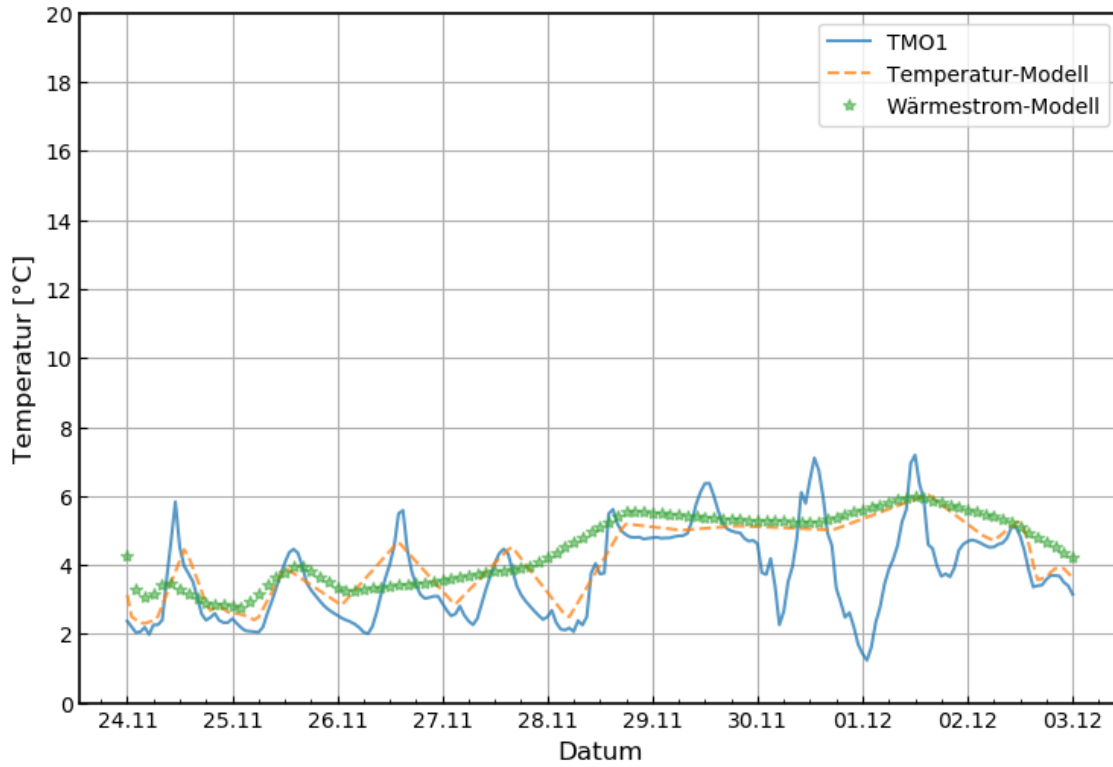


Abb. 5-1 Testfeld A1.1 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

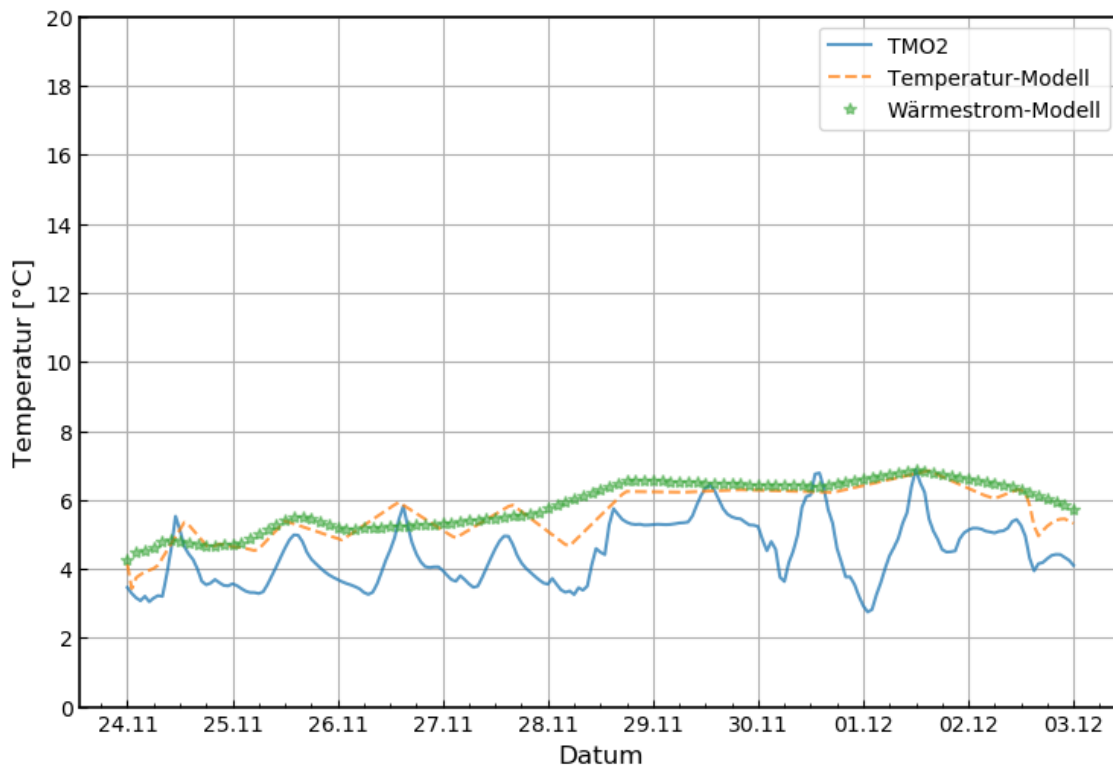


Abb. 5-2 Testfeld A1.1 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

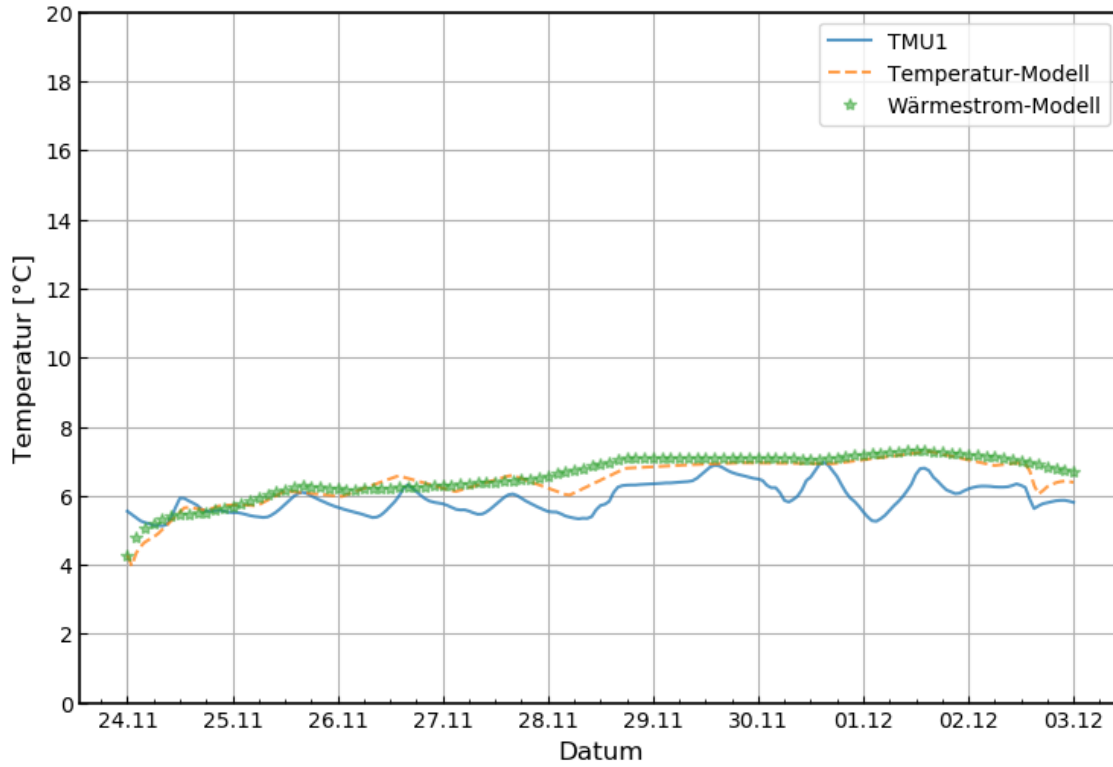


Abb. 5-3 Testfeld A1.1 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

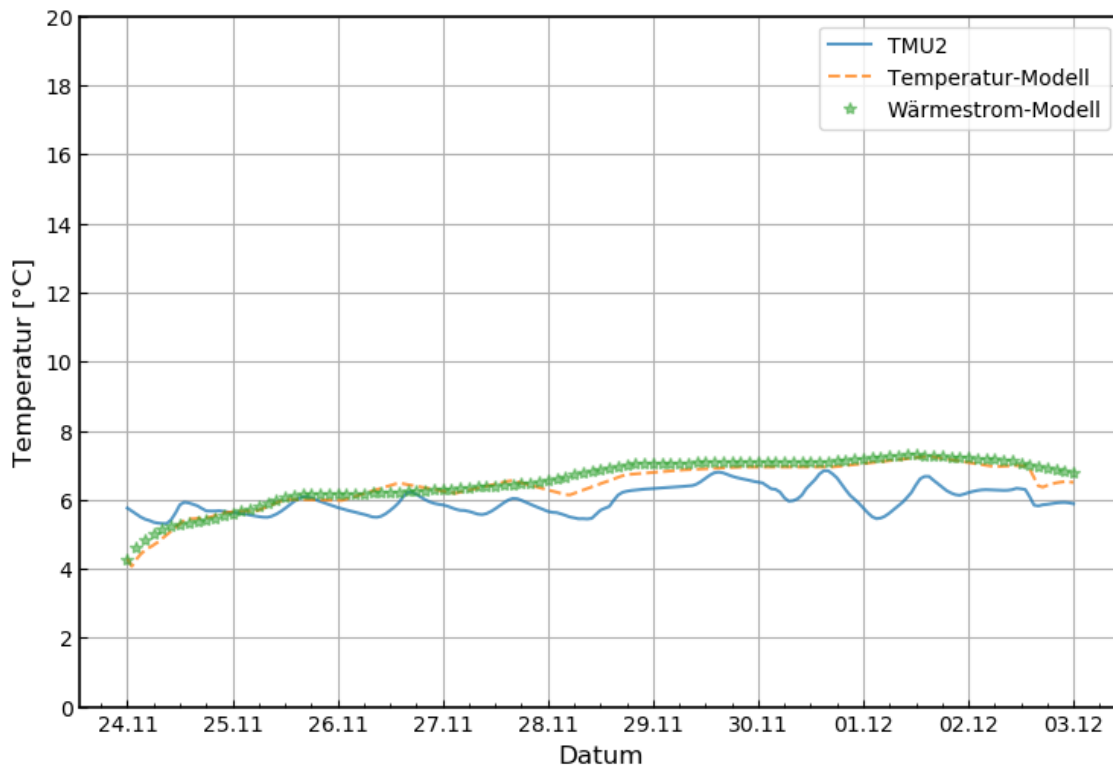


Abb. 5-4 Testfeld A1.1 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

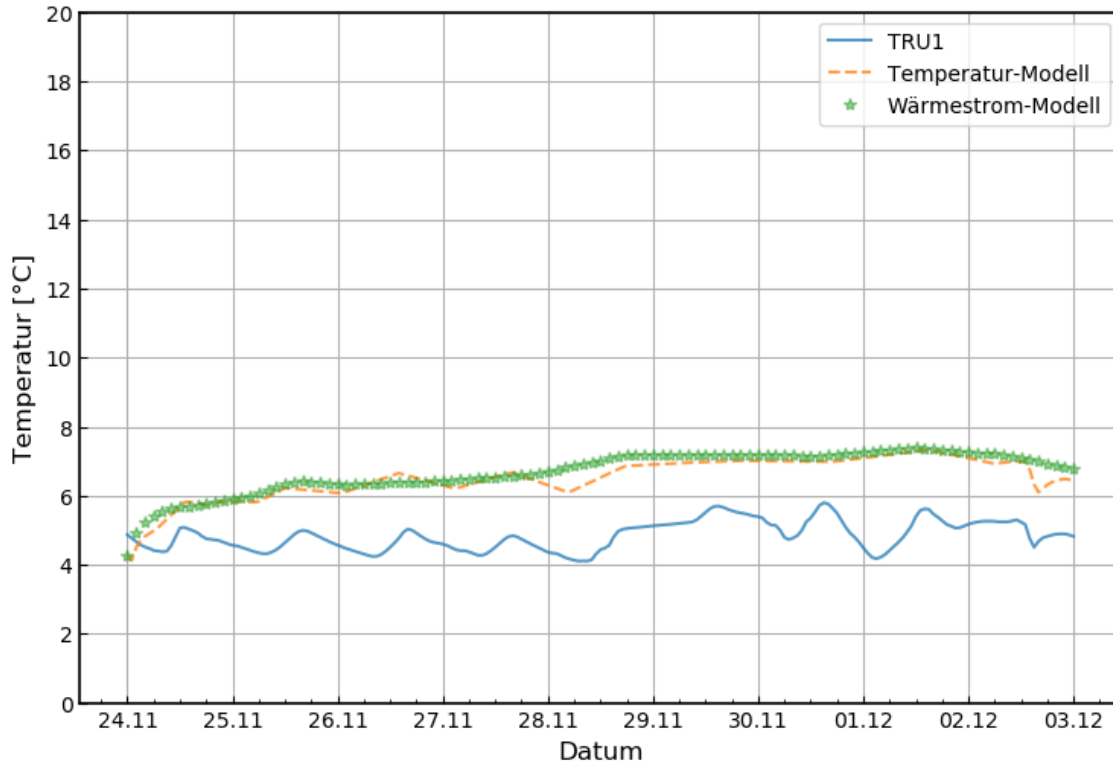


Abb. 5-5 Testfeld A1.1 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

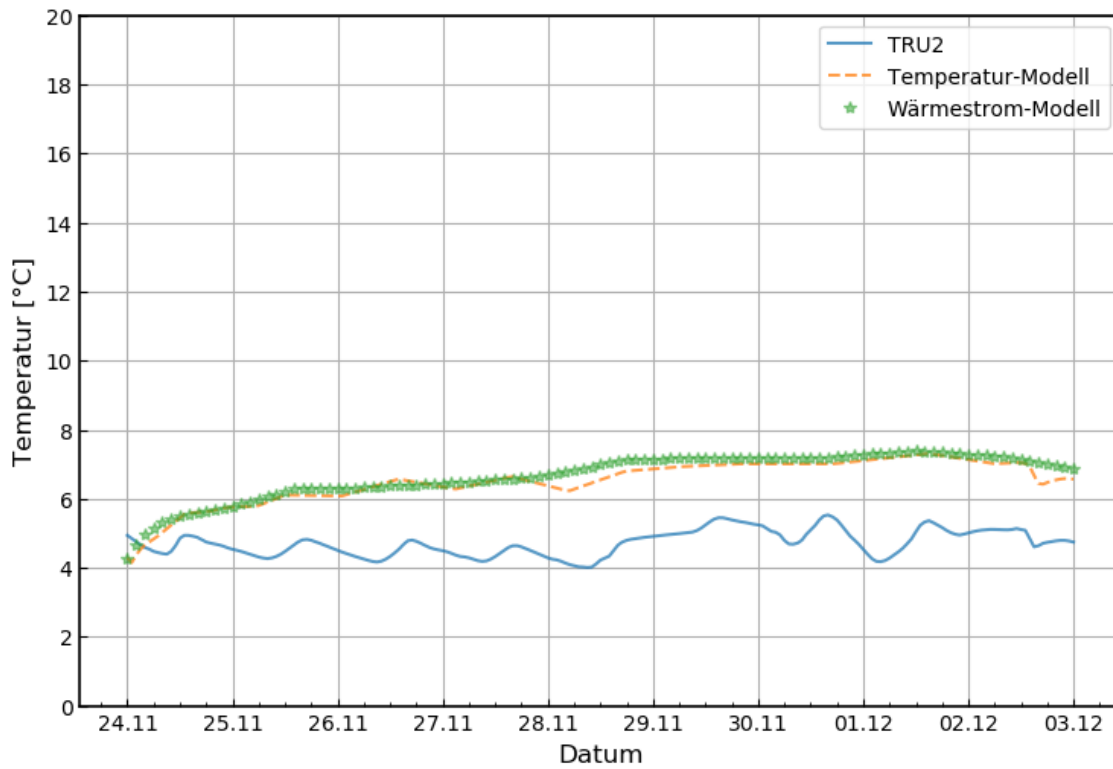


Abb. 5-6 Testfeld A1.1 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



## 5.2 Testfeld A1.2

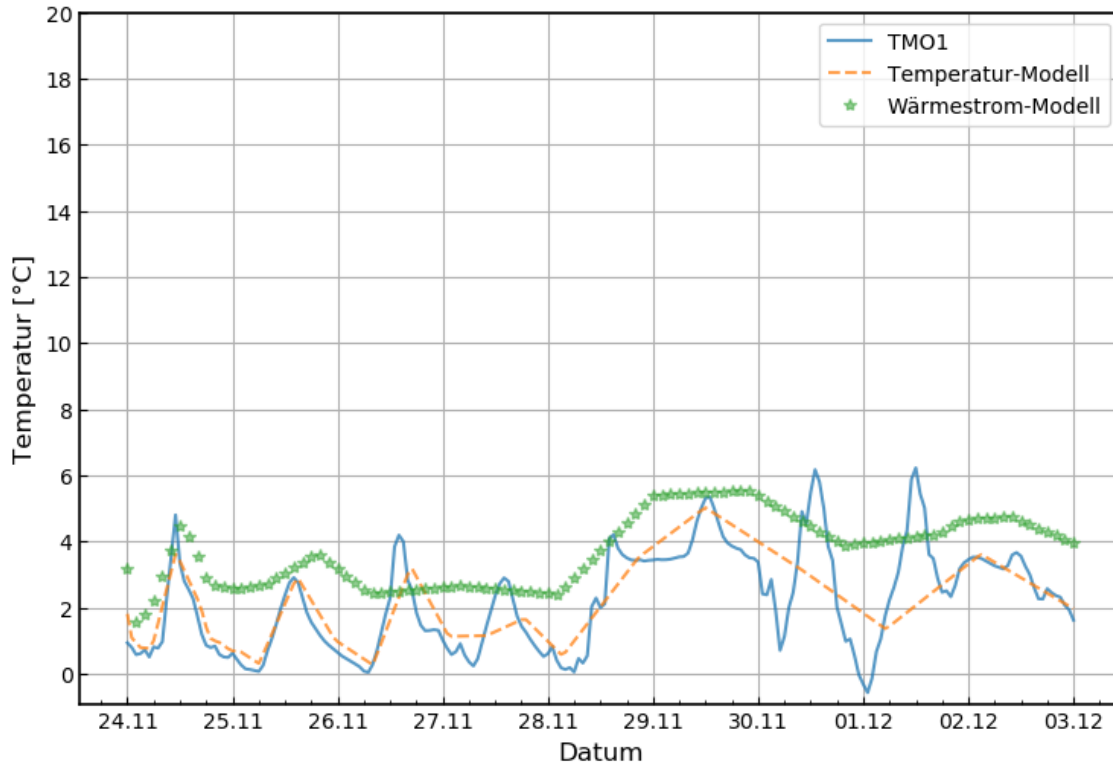


Abb. 5-7 Testfeld A1.2 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

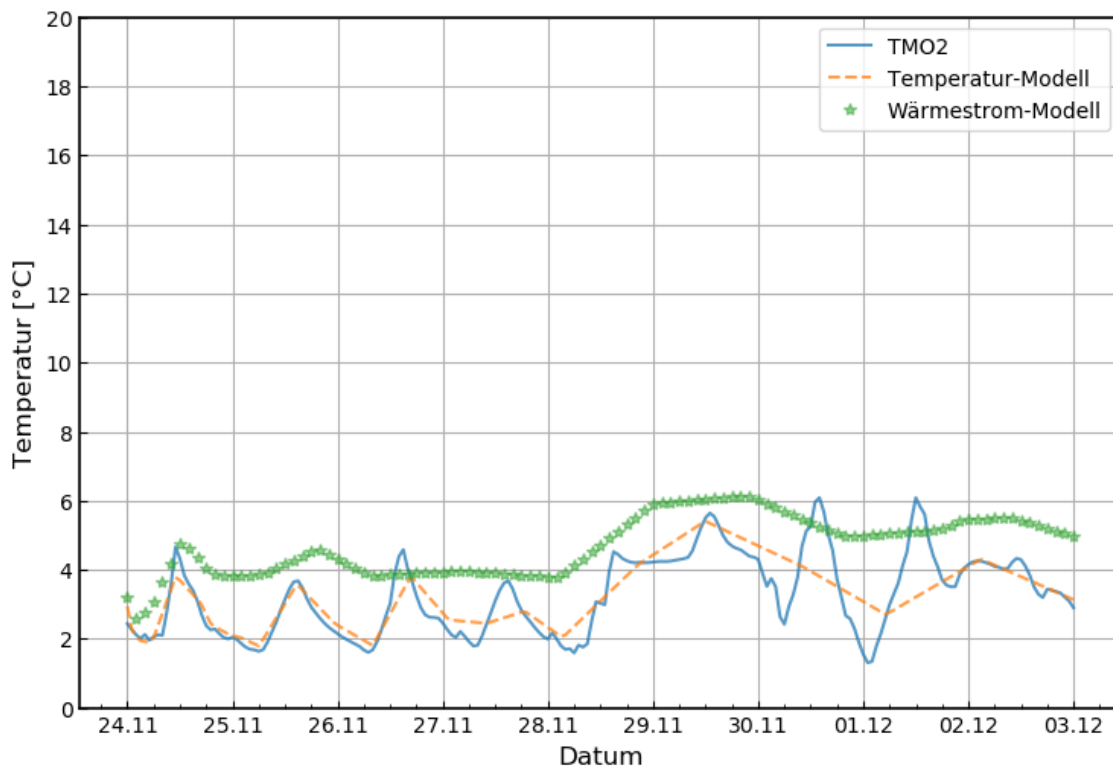


Abb. 5-8 Testfeld A1.2 – Sensor TMO2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

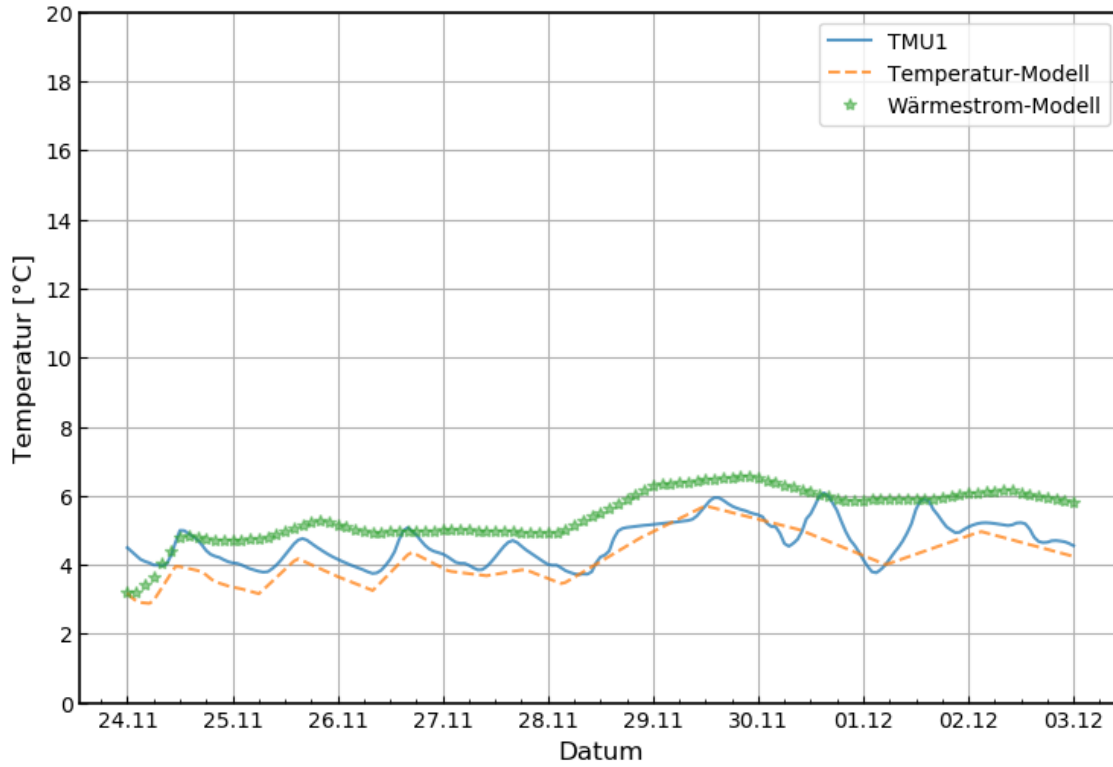


Abb. 5-9 Testfeld A1.2 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

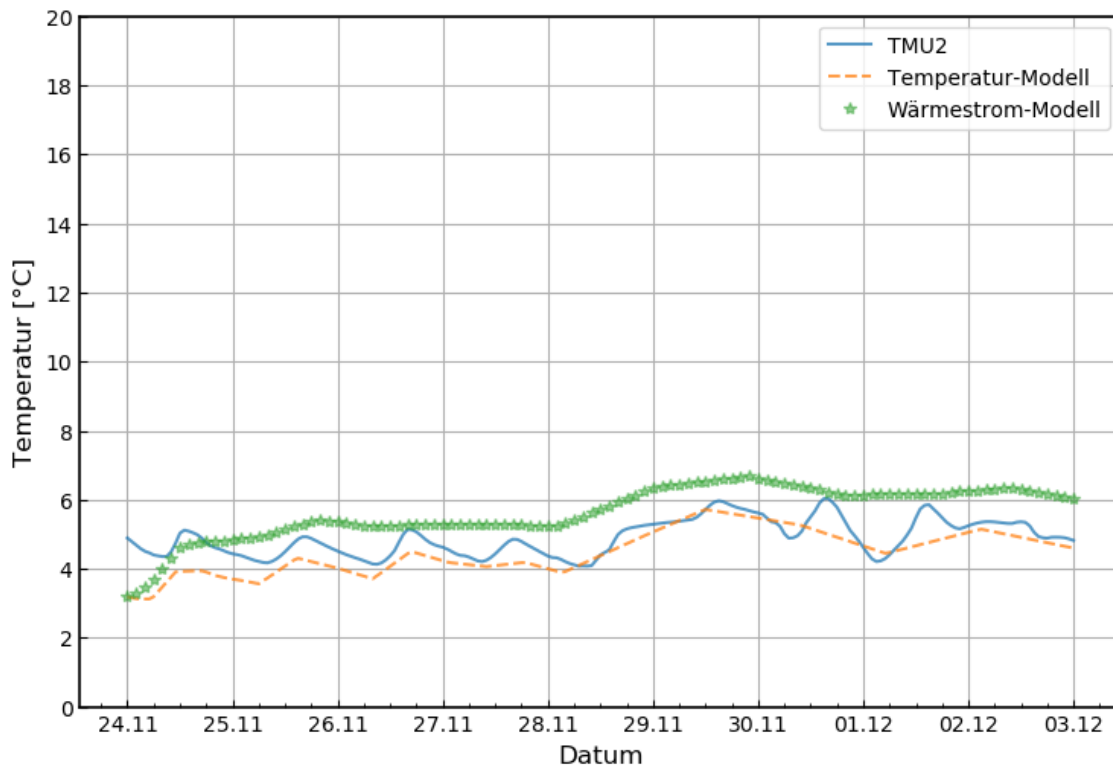


Abb. 5-10 Testfeld A1.2 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

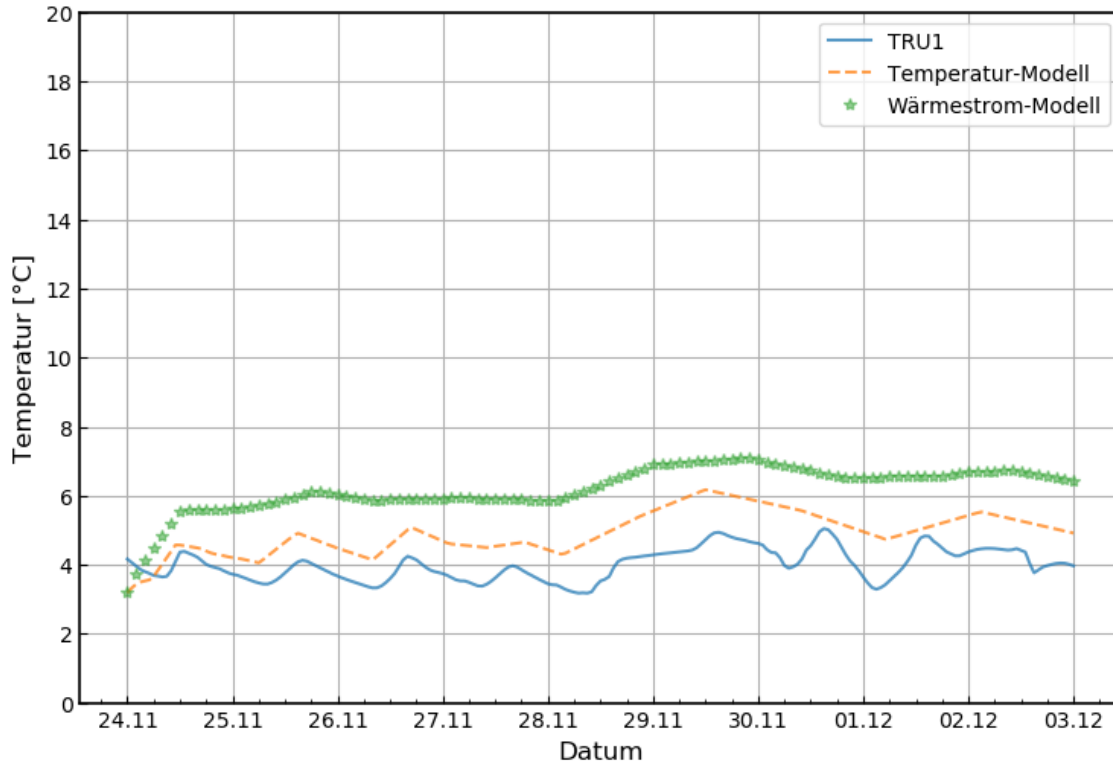


Abb. 5-11 Testfeld A1.2 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

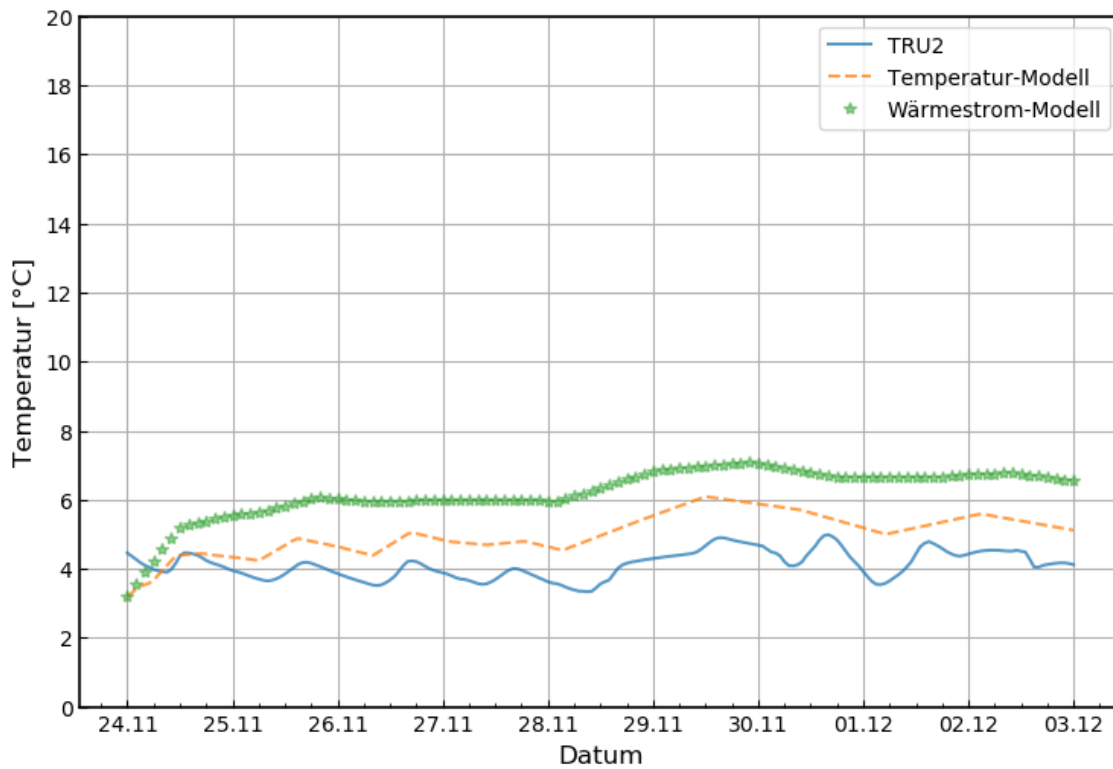


Abb. 5-12 Testfeld A1.2 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

### 5.3 Testfeld A1.3

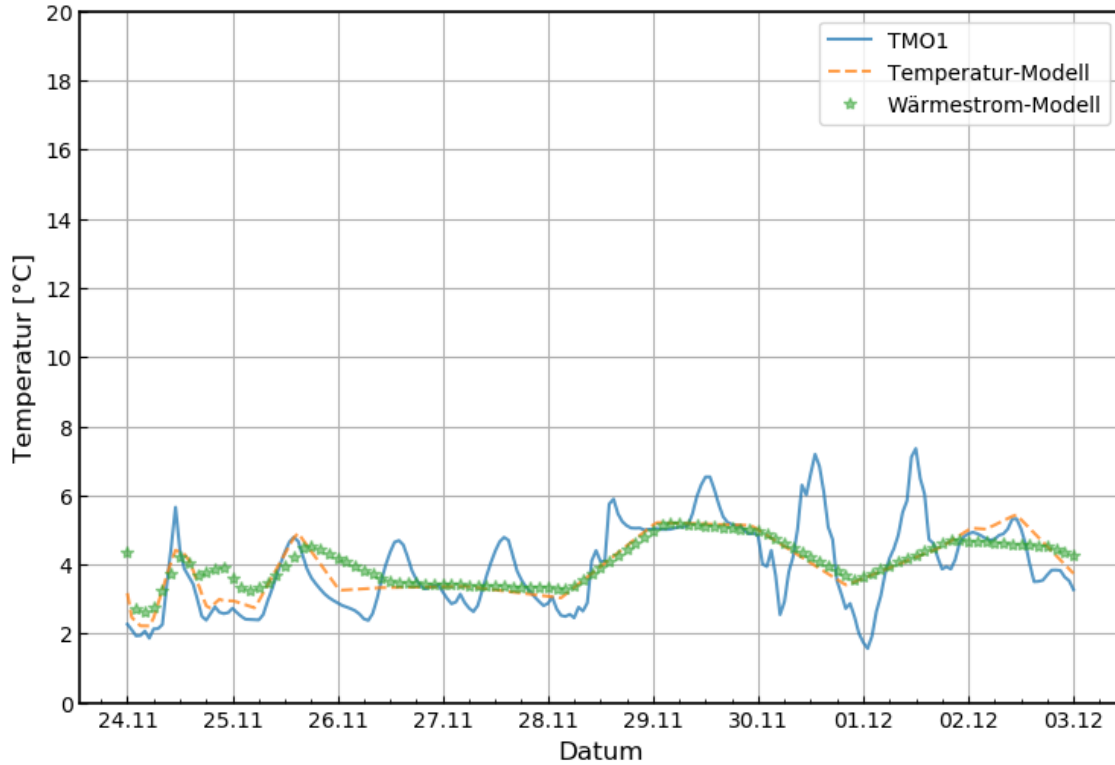


Abb. 5-13 Testfeld A1.3 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

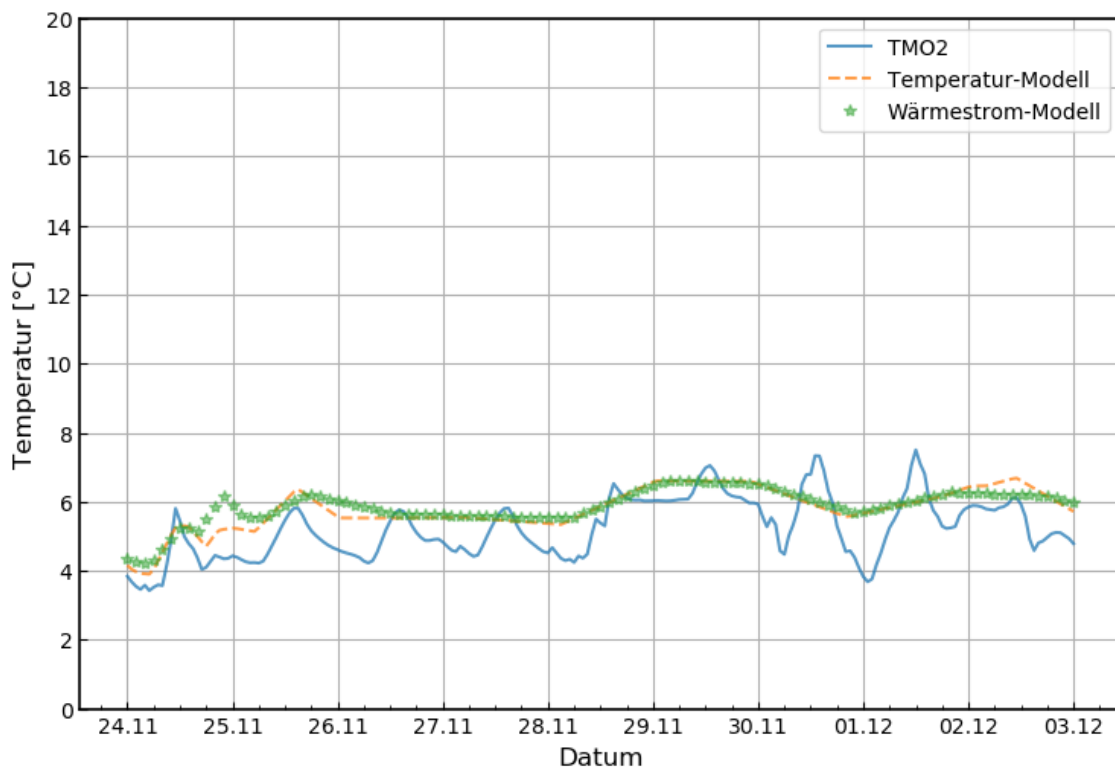


Abb. 5-14 Testfeld A1.3 – Sensor TMO2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

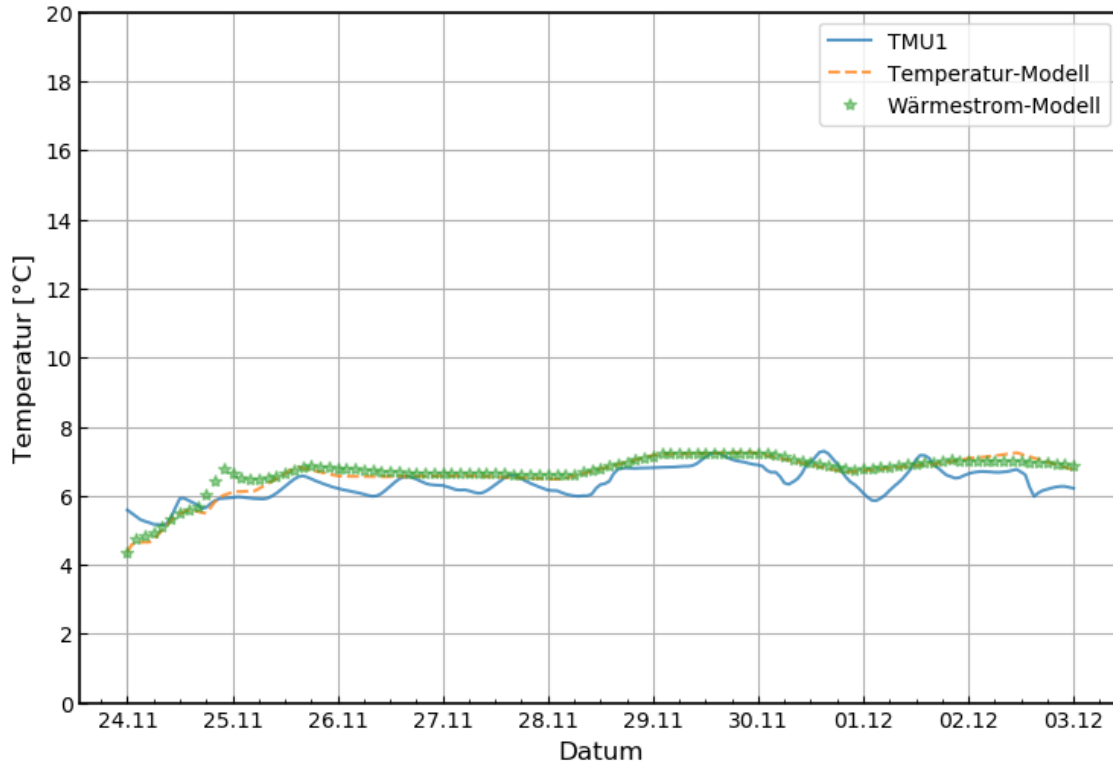


Abb. 5-15 Testfeld A1.3 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

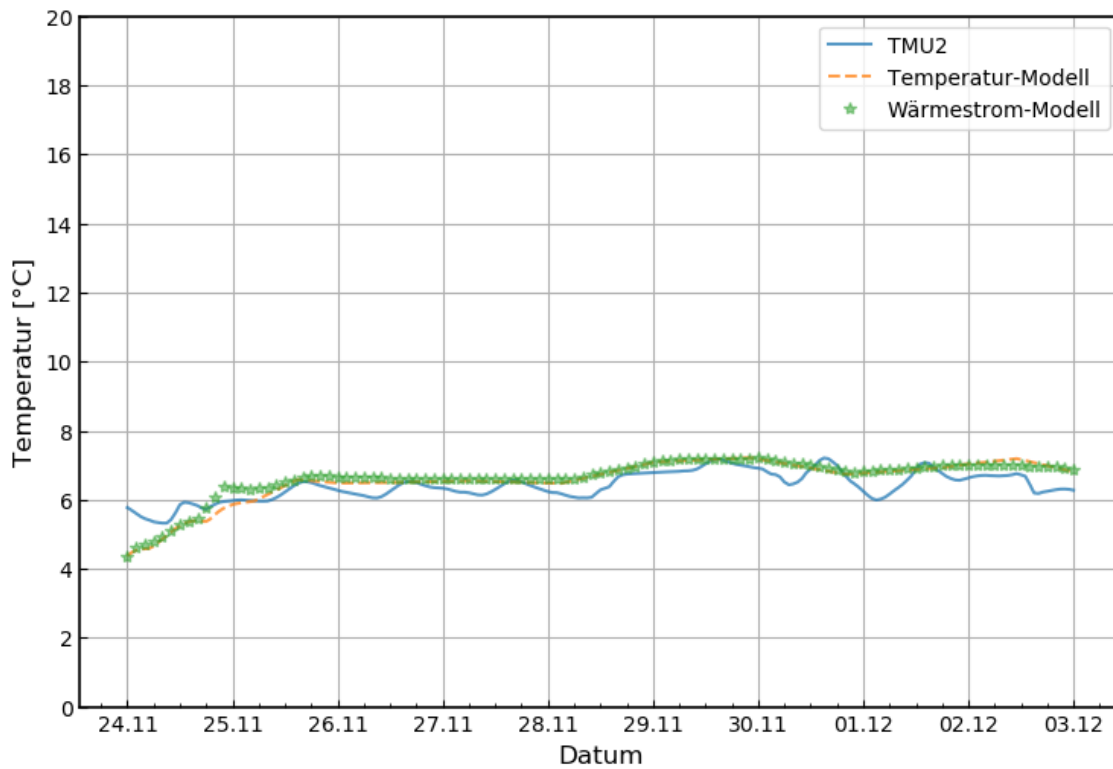


Abb. 5-16 Testfeld A1.3 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



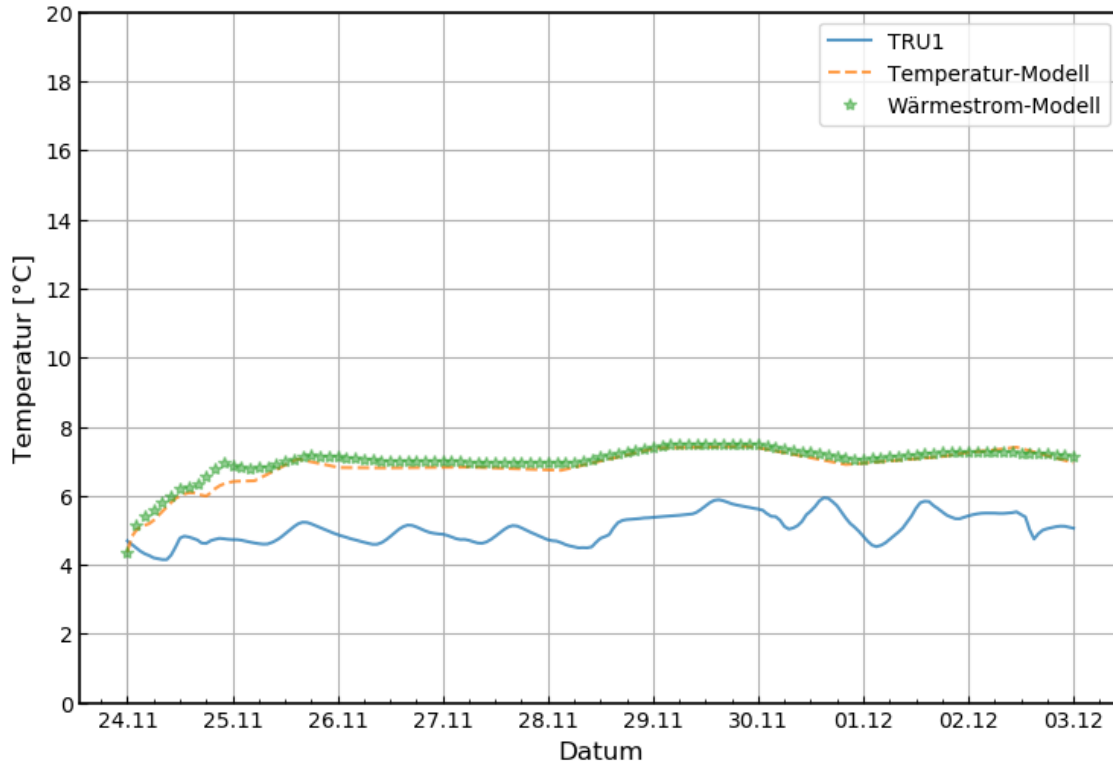


Abb. 5-17 Testfeld A1.3 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

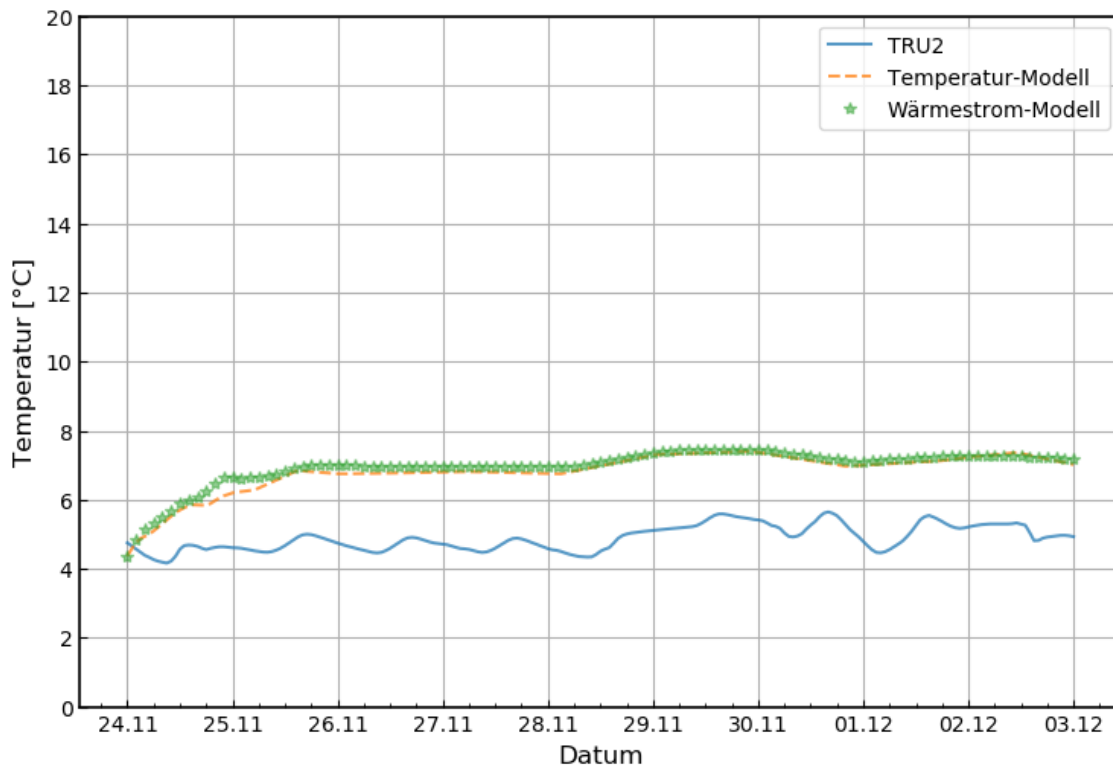


Abb. 5-18 Testfeld A1.3 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



### 5.4 Testfeld A1.4

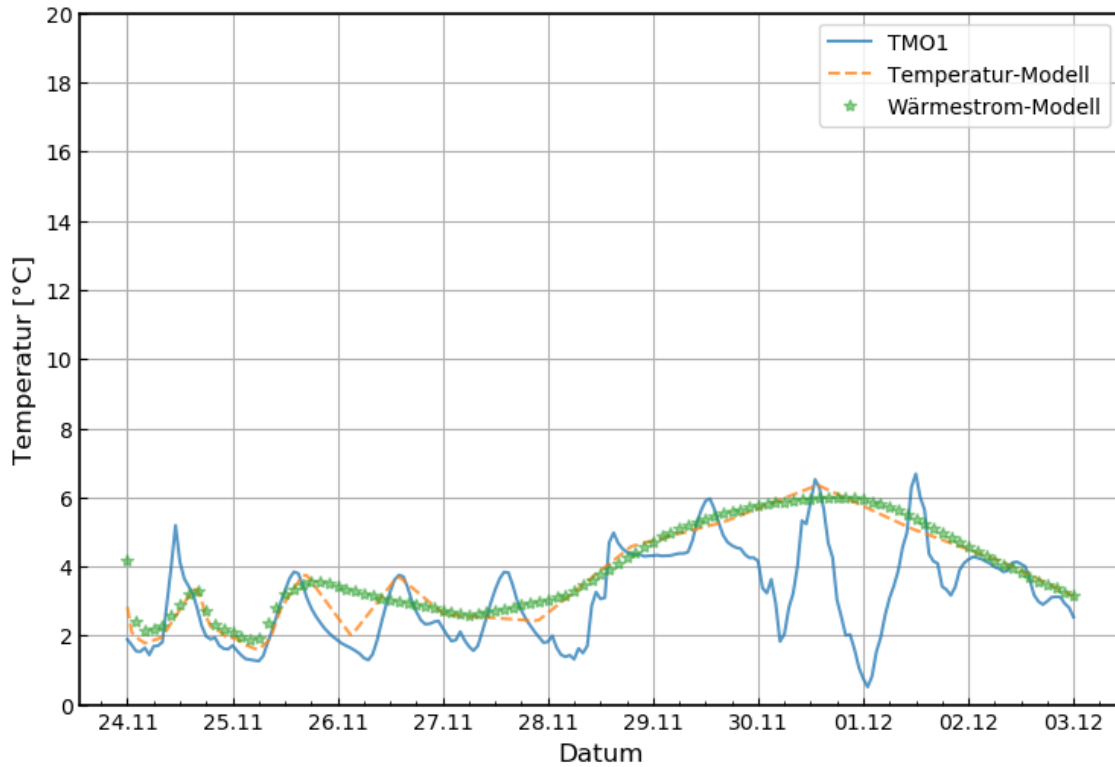


Abb. 5-19 Testfeld A1.4 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

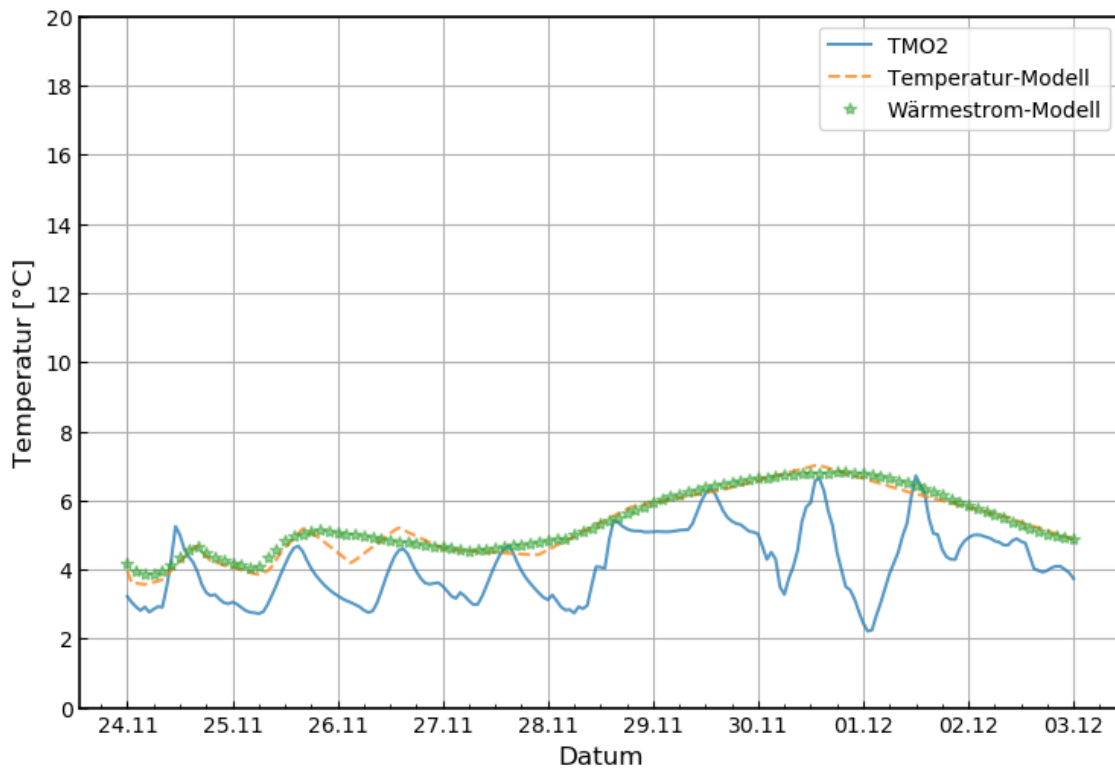


Abb. 5-20 Testfeld A1.4 – Sensor TMO2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

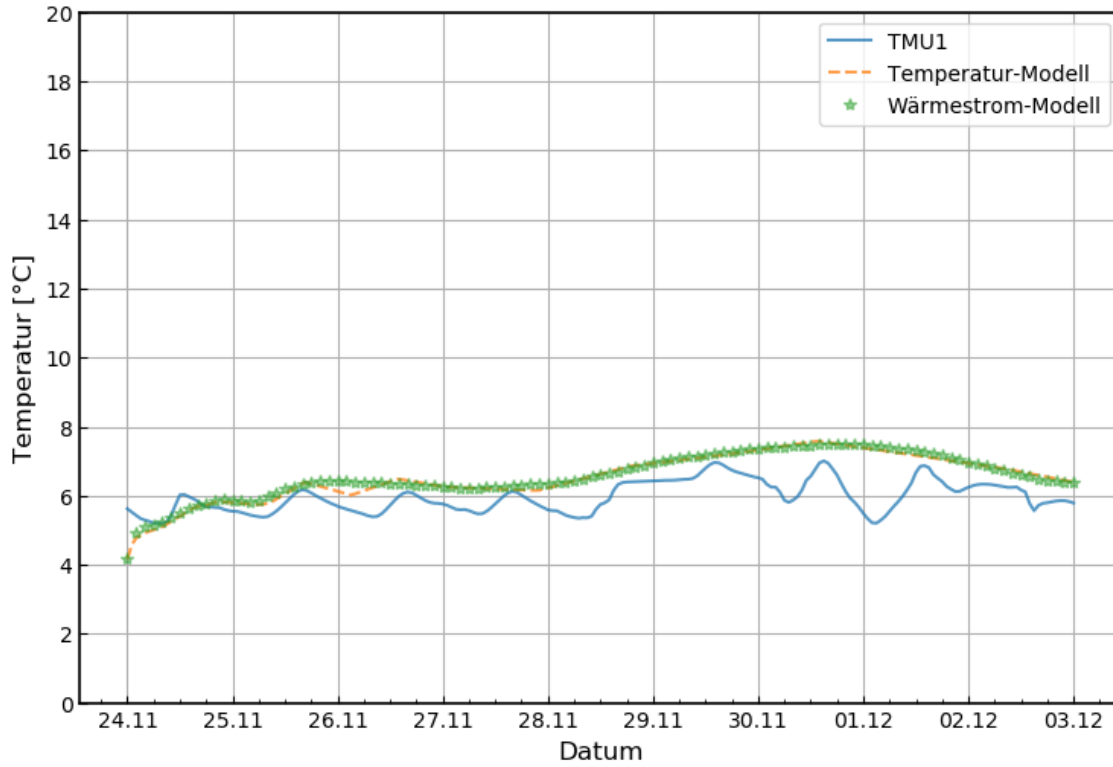


Abb. 5-21 Testfeld A1.4 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

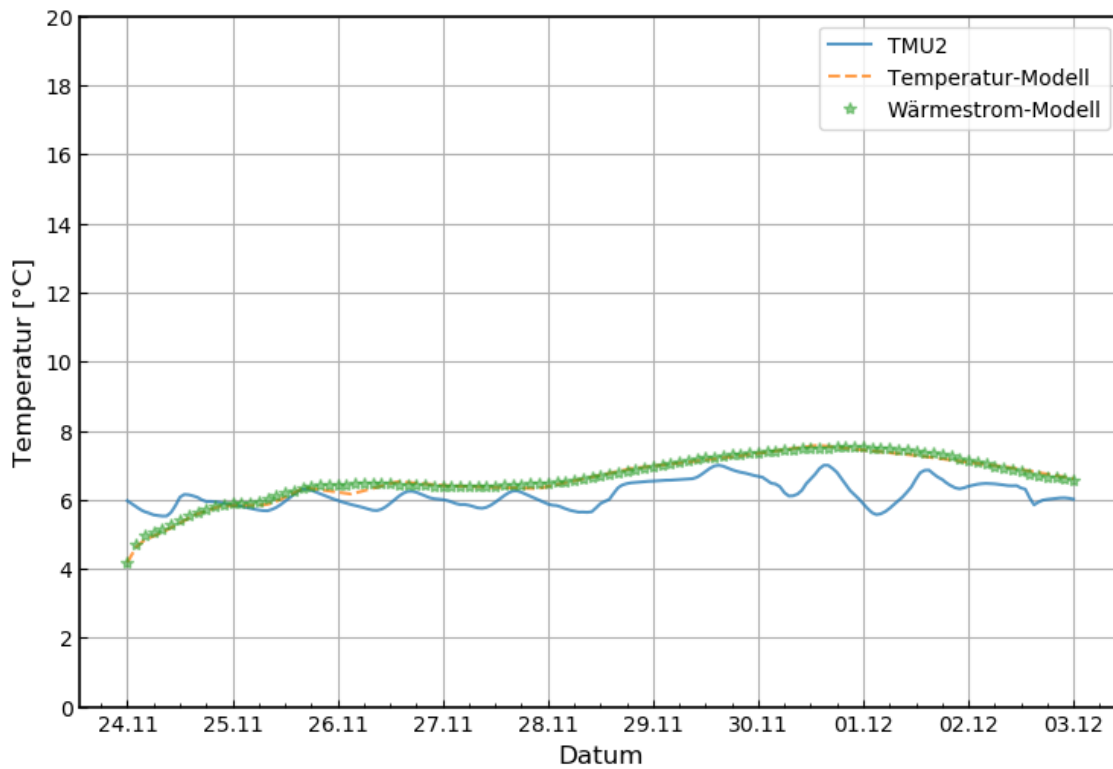


Abb. 5-22 Testfeld A1.4 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

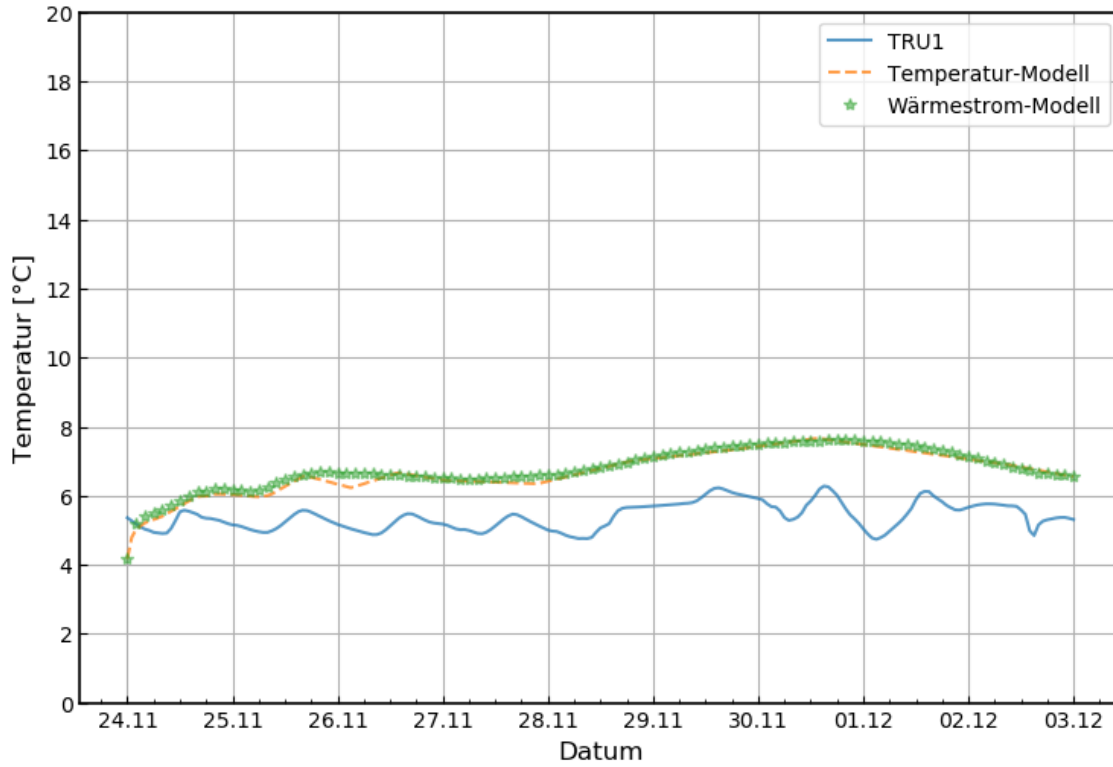


Abb. 5-23 Testfeld A1.4 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

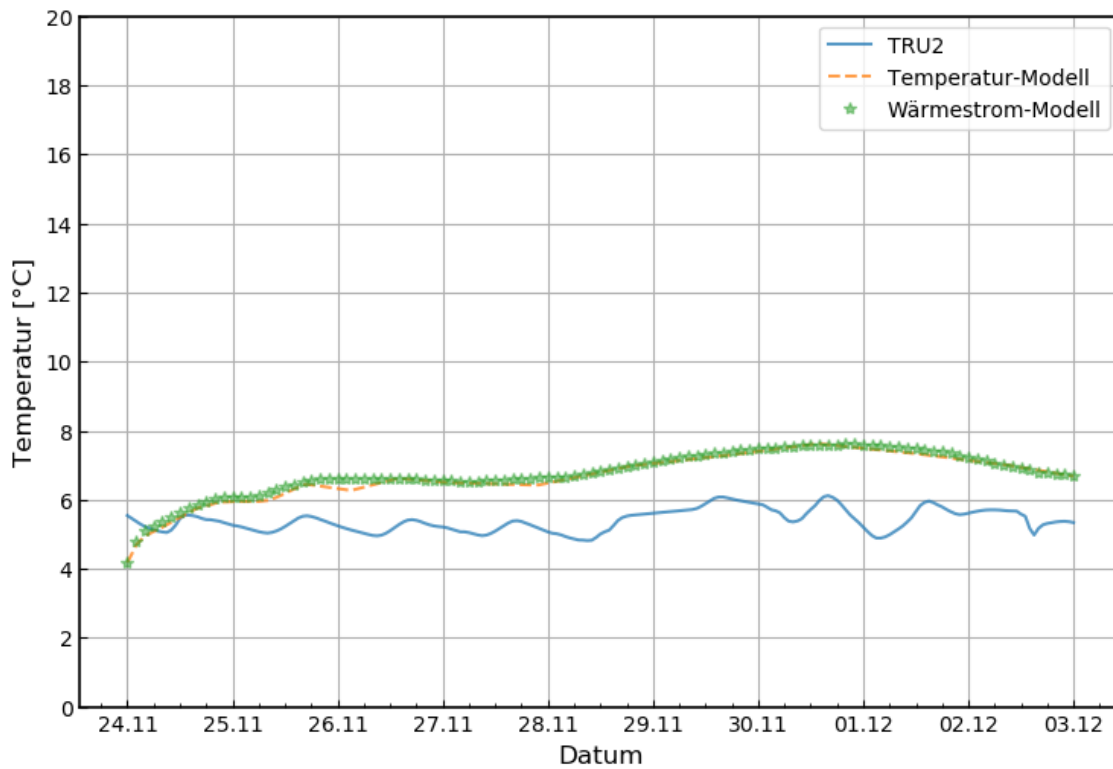


Abb. 5-24 Testfeld A1.4 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



### 5.5 Testfeld A1.5

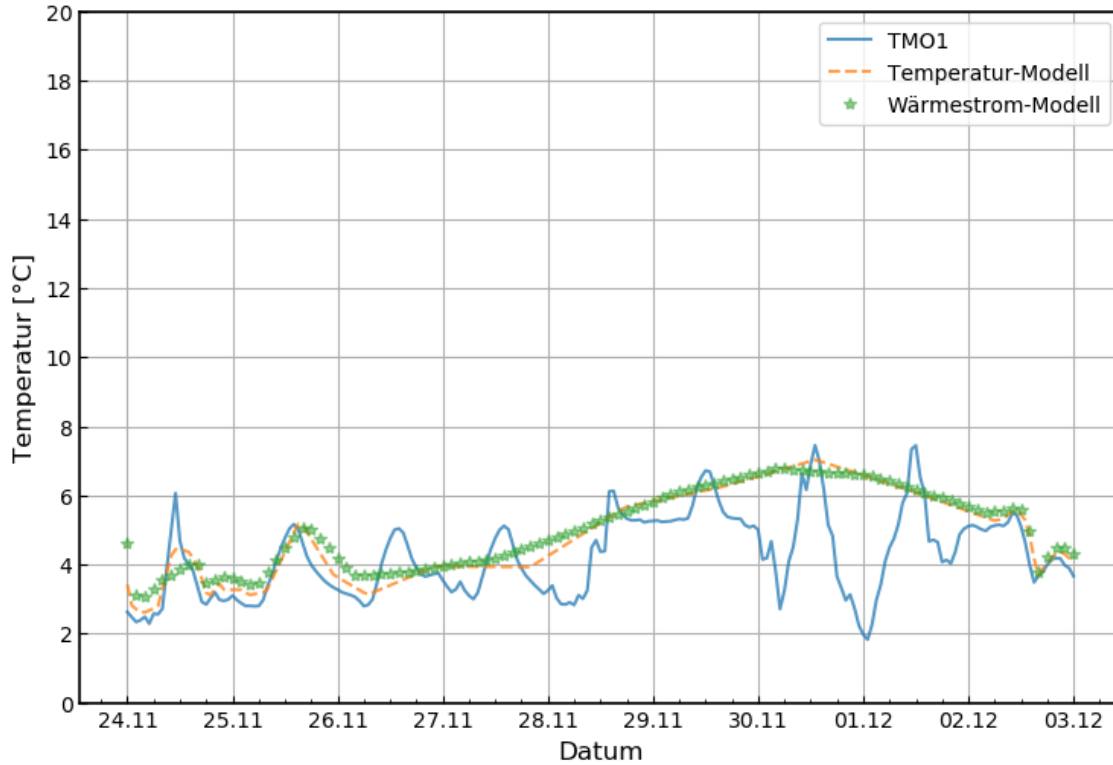


Abb. 5-25 Testfeld A1.5 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

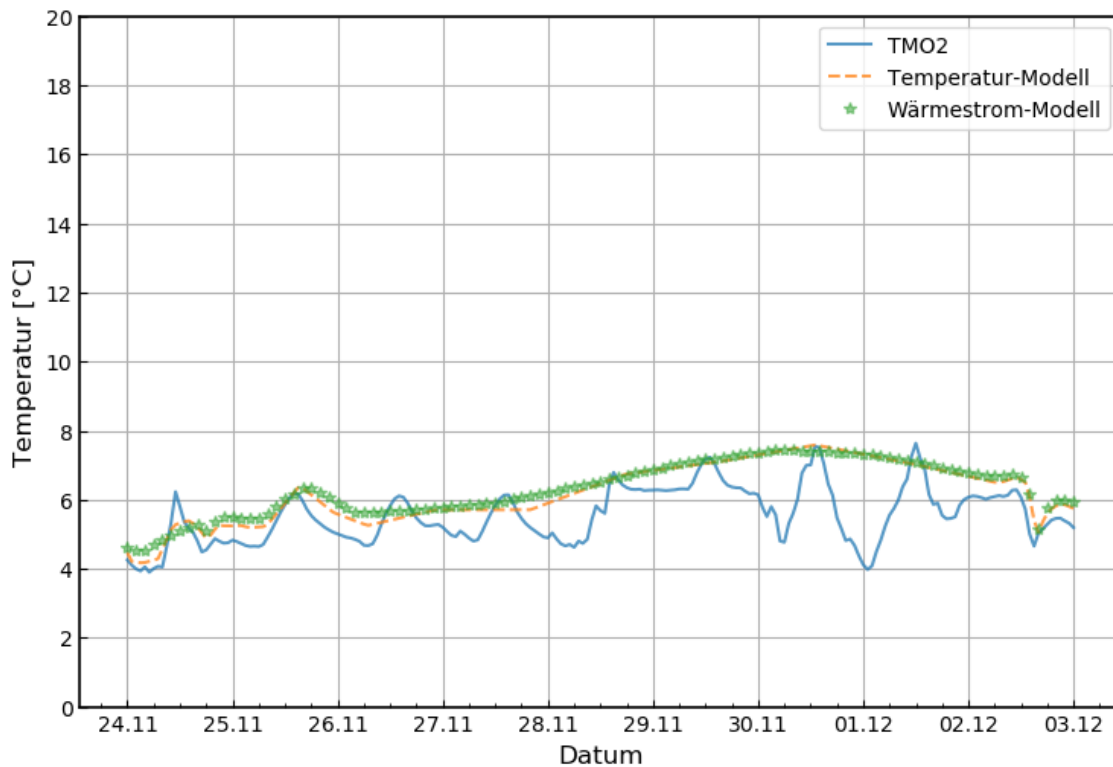


Abb. 5-26 Testfeld A1.5 – Sensor TMO2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

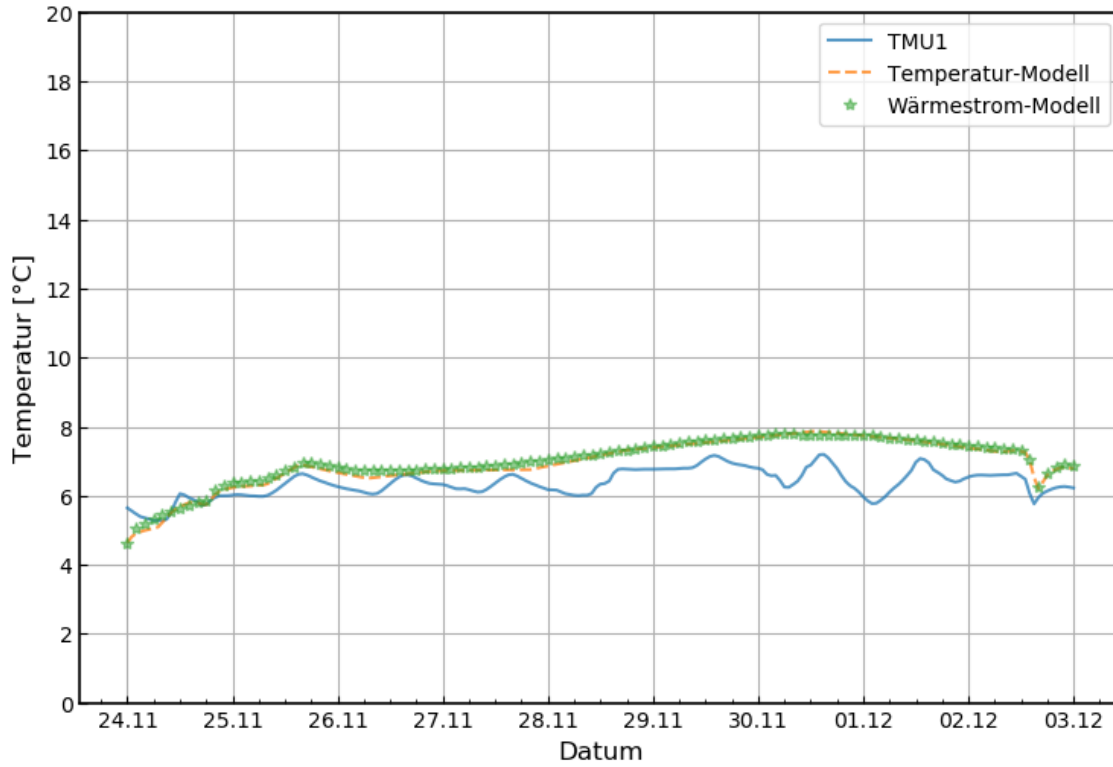


Abb. 5-27 Testfeld A1.5 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

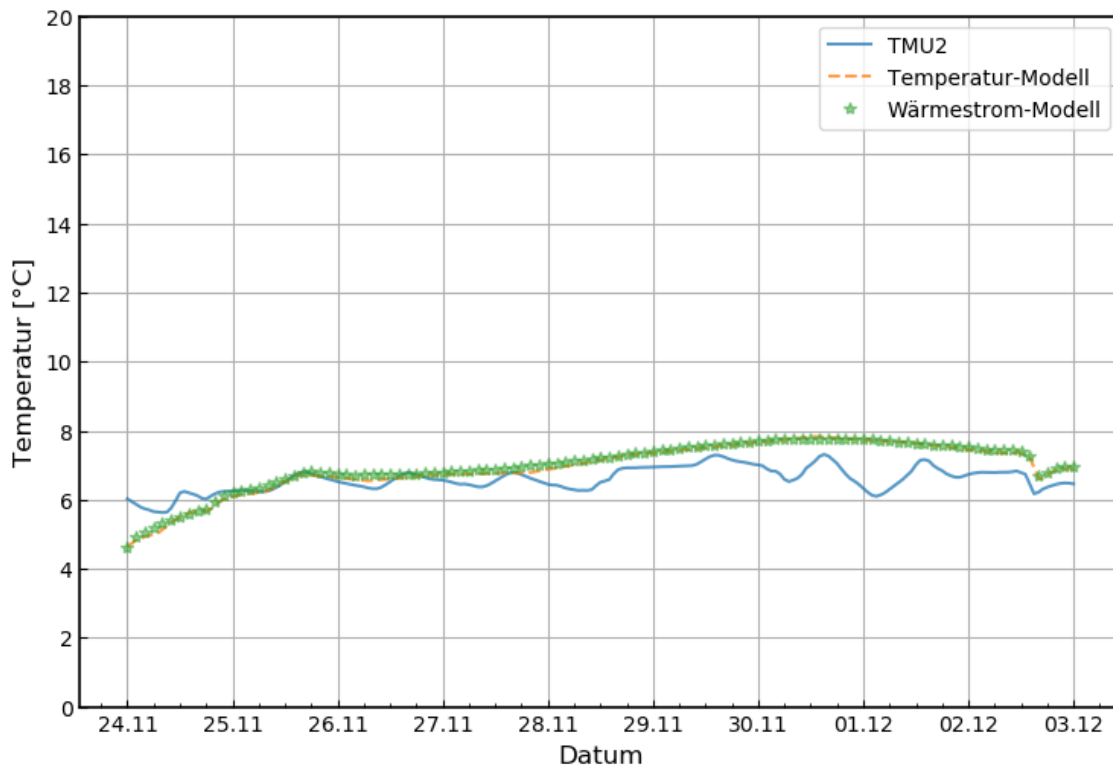


Abb. 5-28 Testfeld A1.5 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

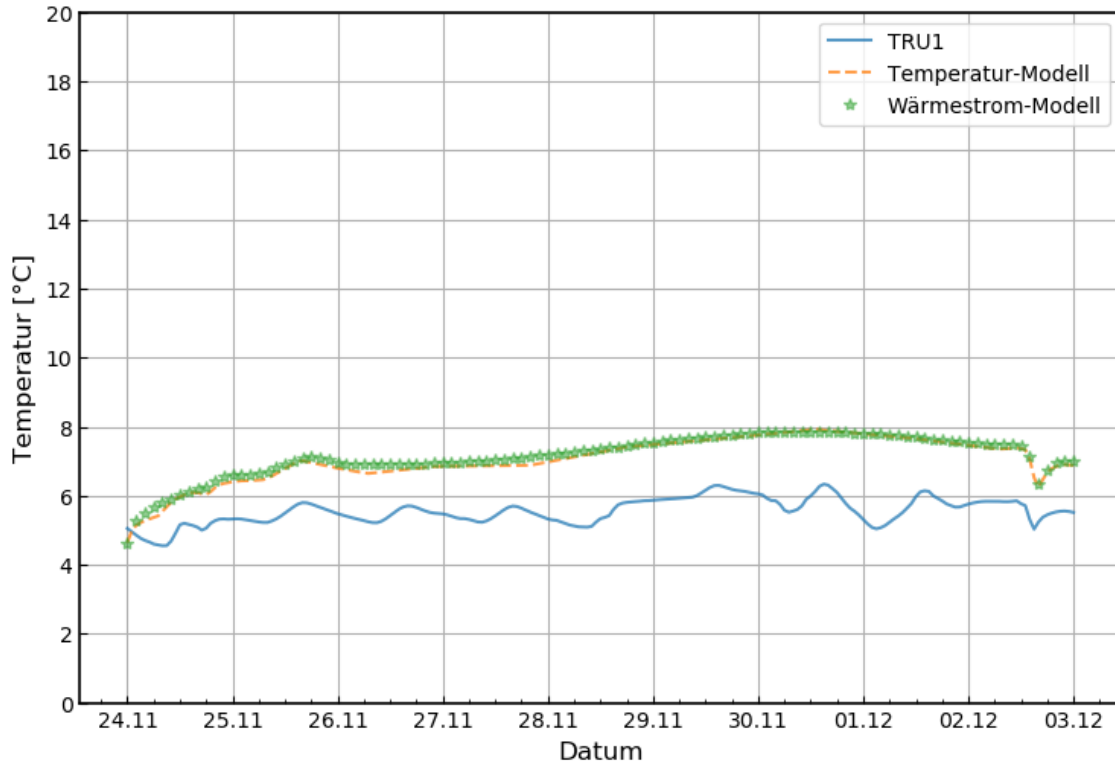


Abb. 5-29 Testfeld A1.5 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

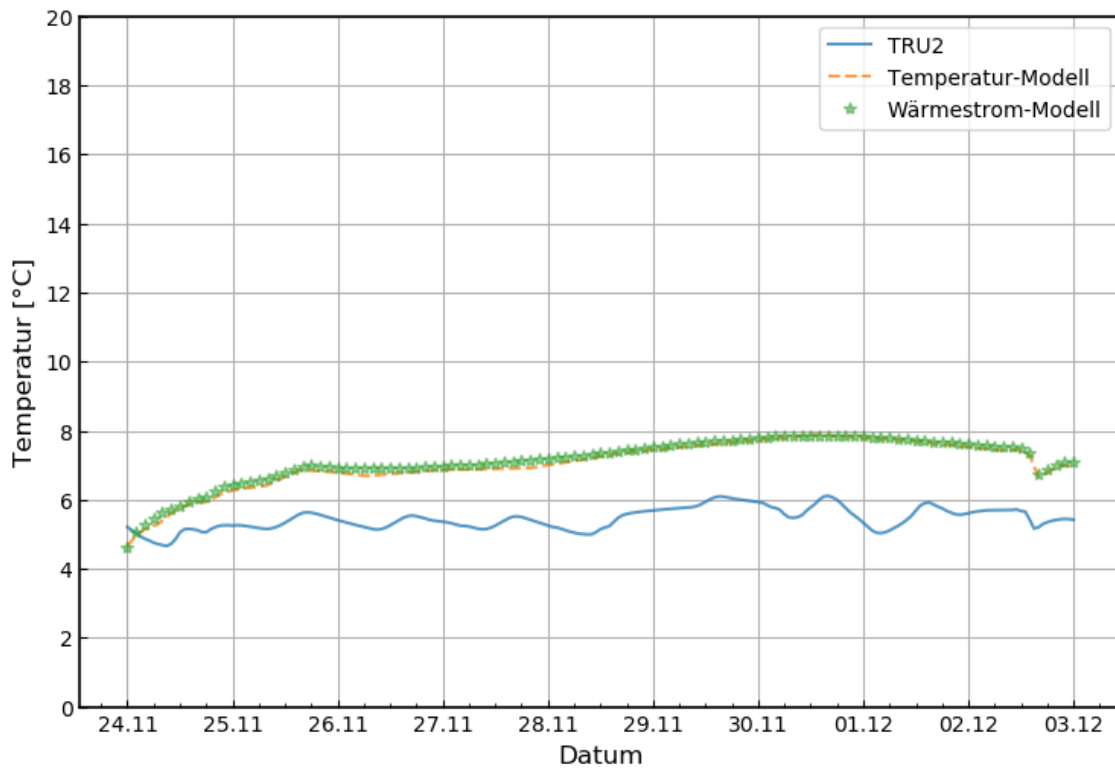


Abb. 5-30 Testfeld A1.5 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



### 5.6 Testfeld B1.1

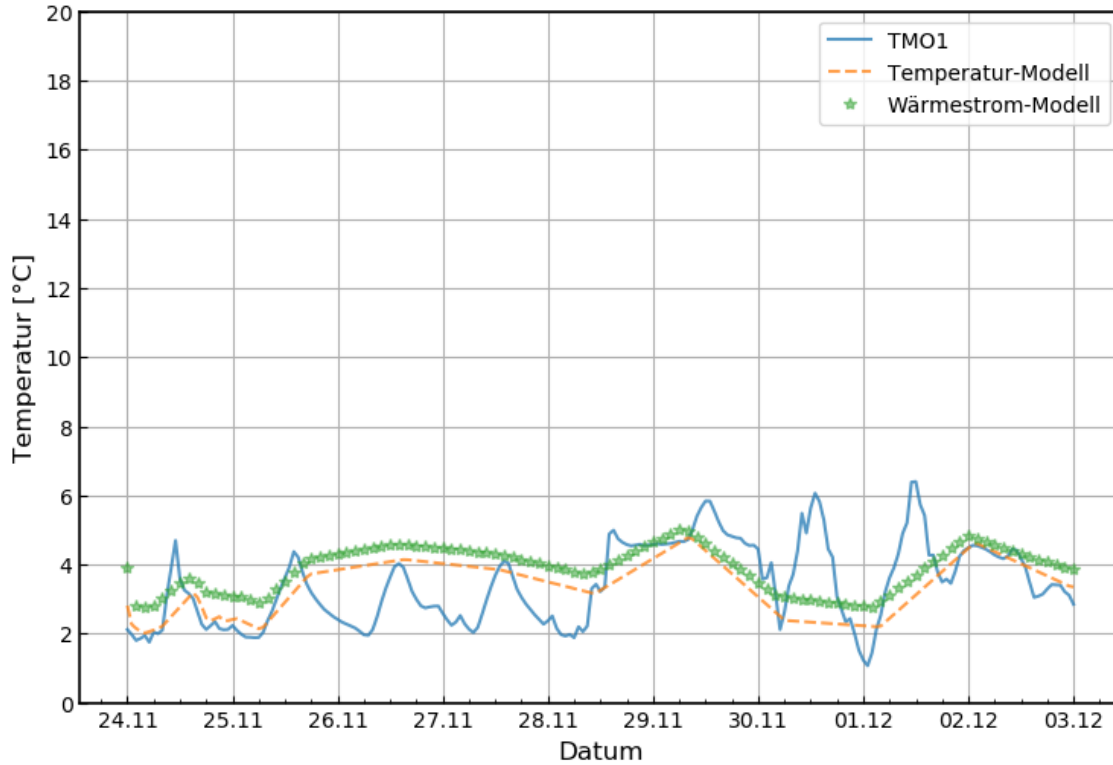


Abb. 5-31 Testfeld B1.1 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

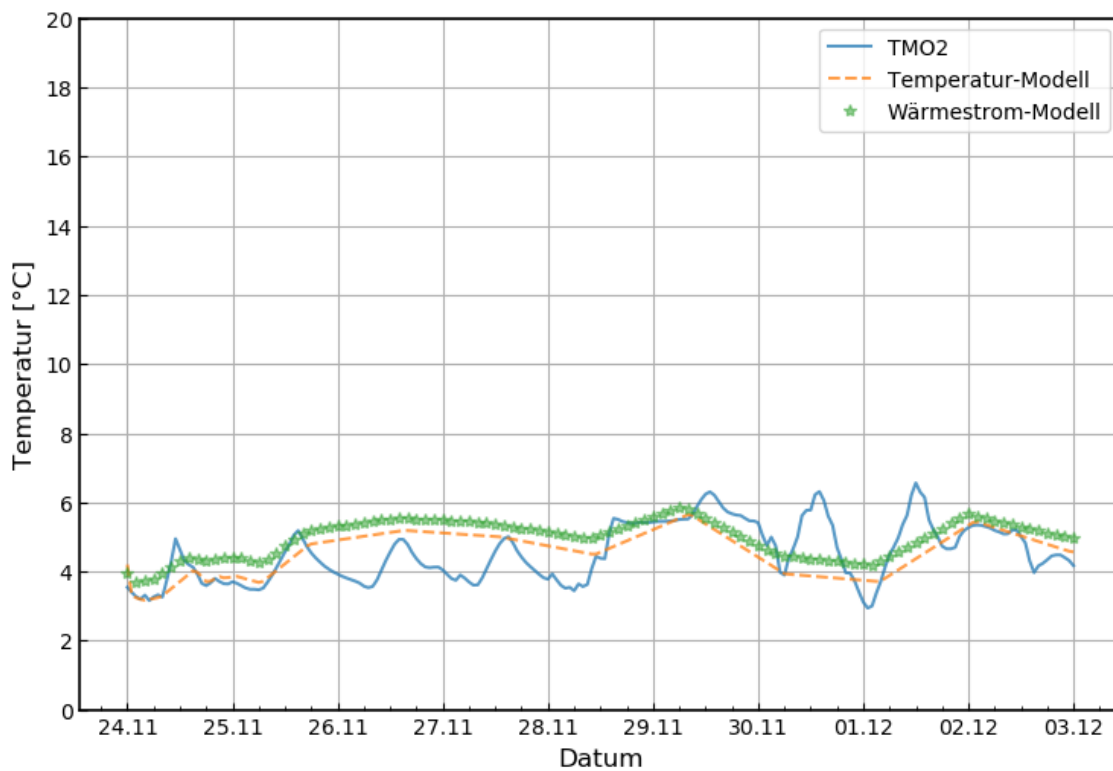


Abb. 5-32 Testfeld B1.1 – Sensor TMO2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



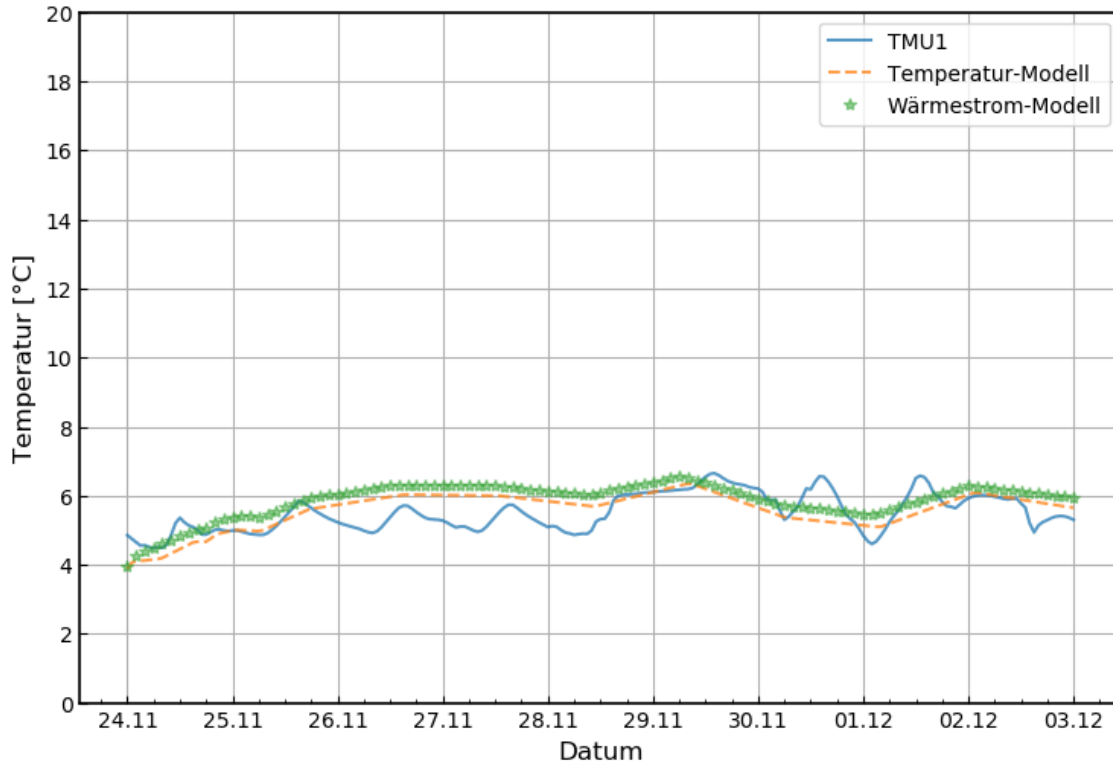


Abb. 5-33 Testfeld B1.1 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

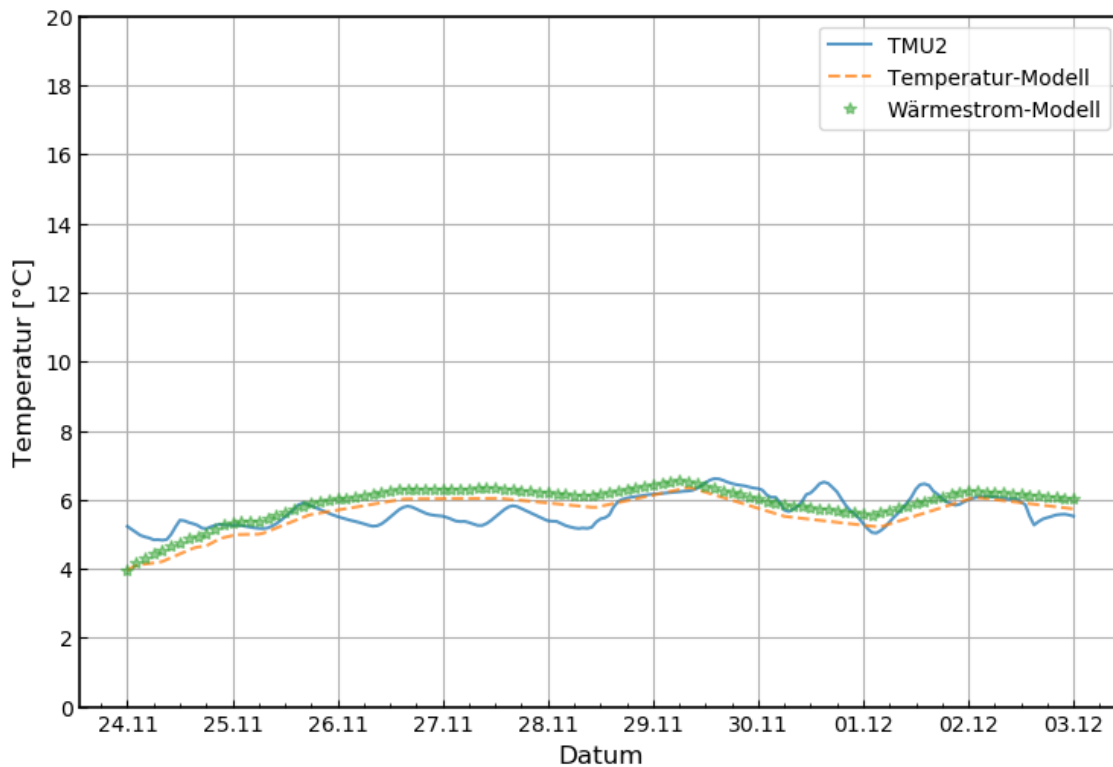


Abb. 5-34 Testfeld B1.1 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

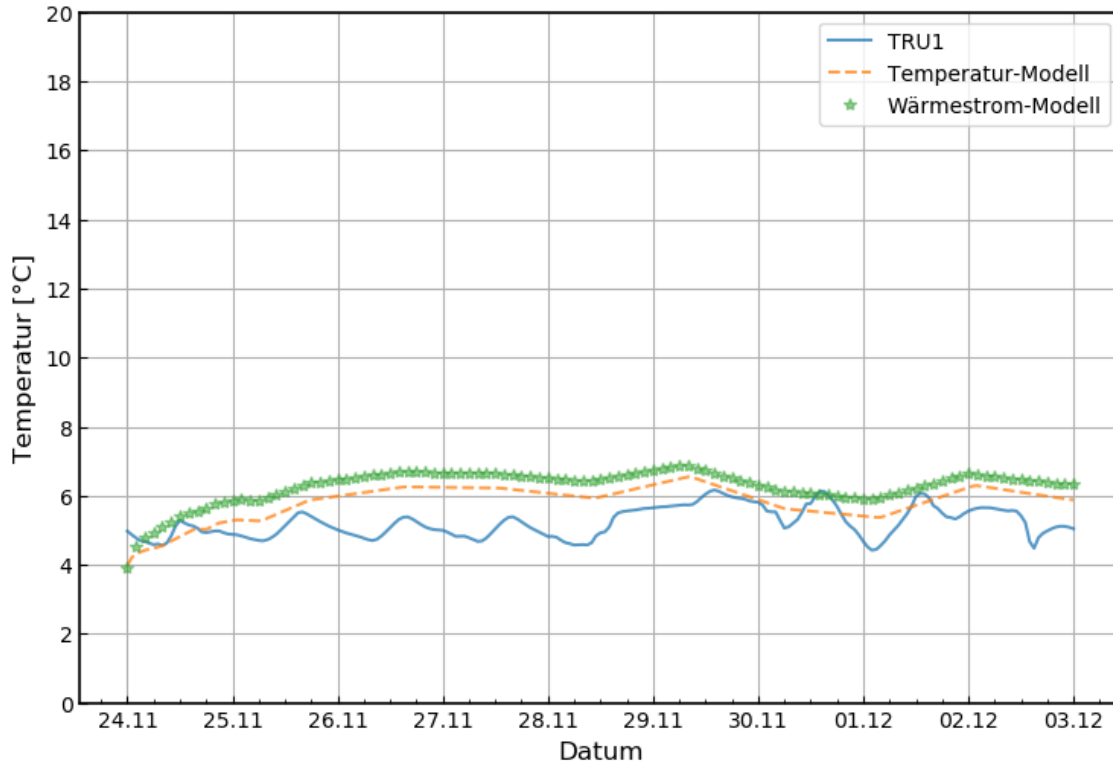


Abb. 5-35 Testfeld B1.1 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

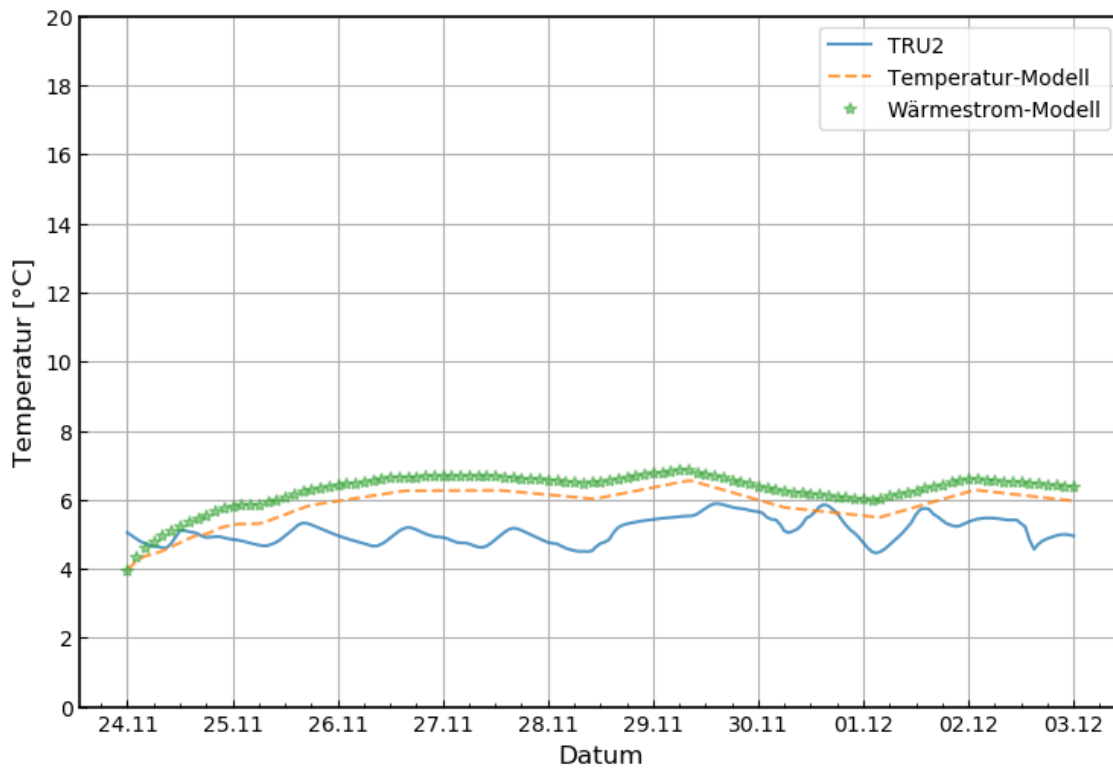


Abb. 5-36 Testfeld B1.1 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung



### 5.7 Testfeld B1.2

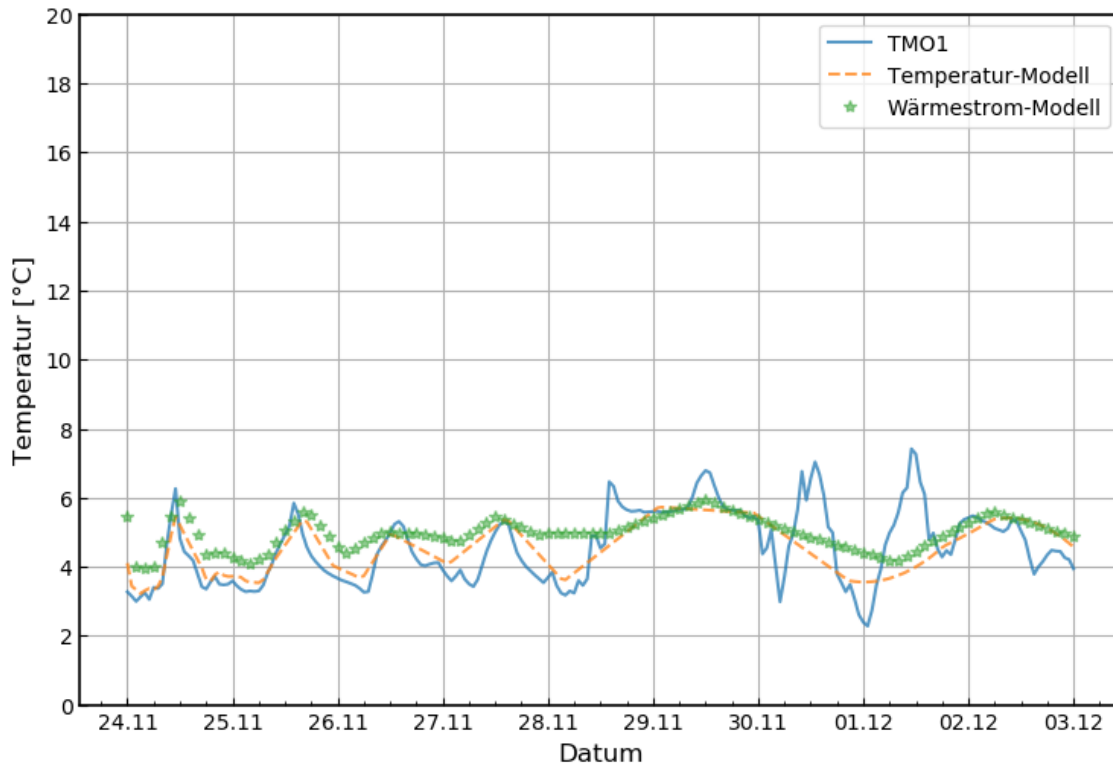


Abb. 5-37 Testfeld B1.2 – Sensor TMO1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

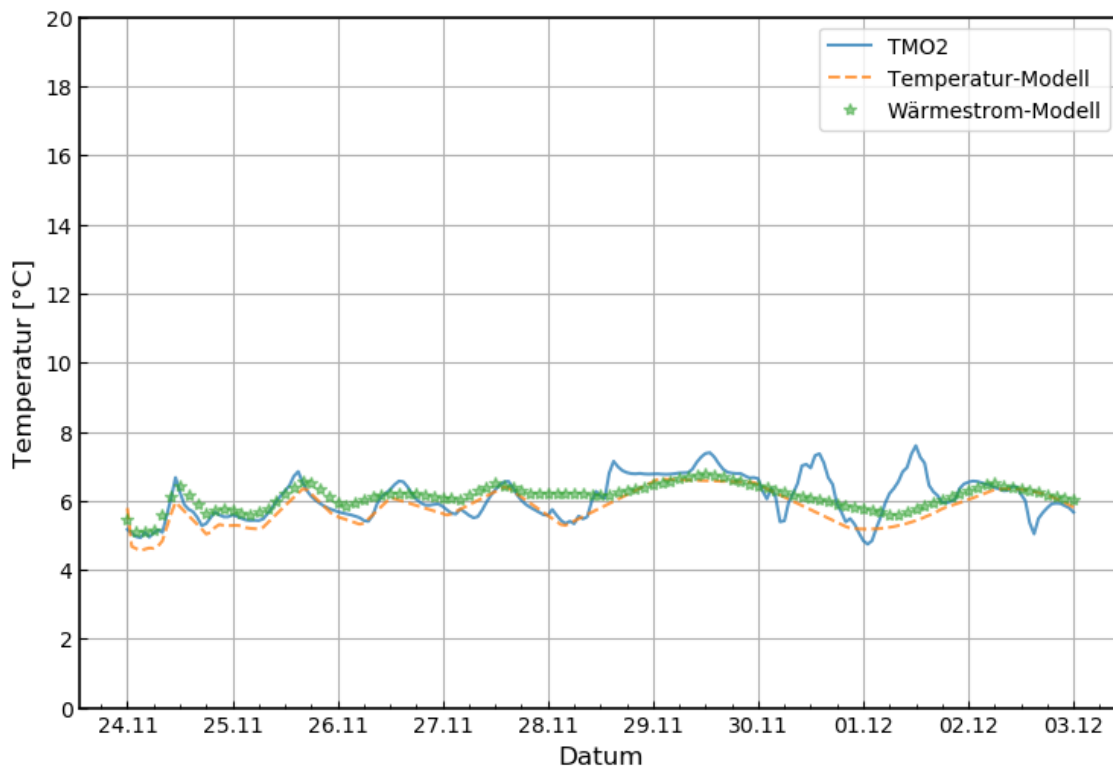


Abb. 5-38 Testfeld B1.2 – Sensor TMO2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

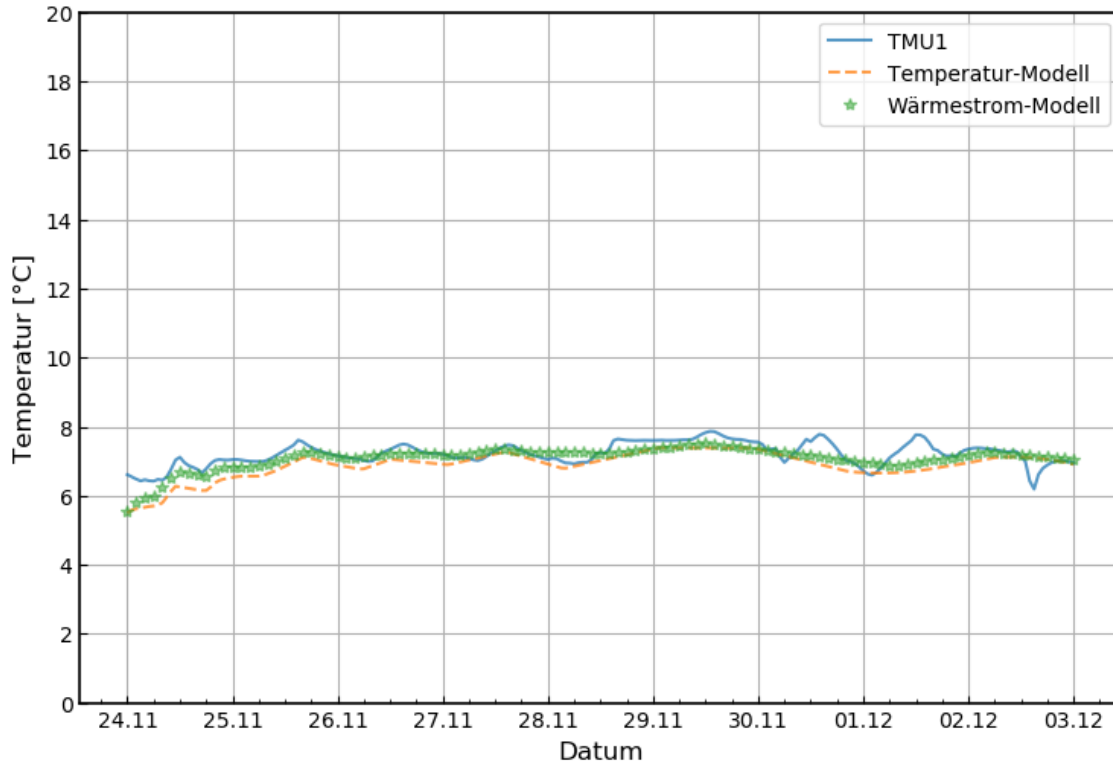


Abb. 5-39 Testfeld B1.2 – Sensor TMU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

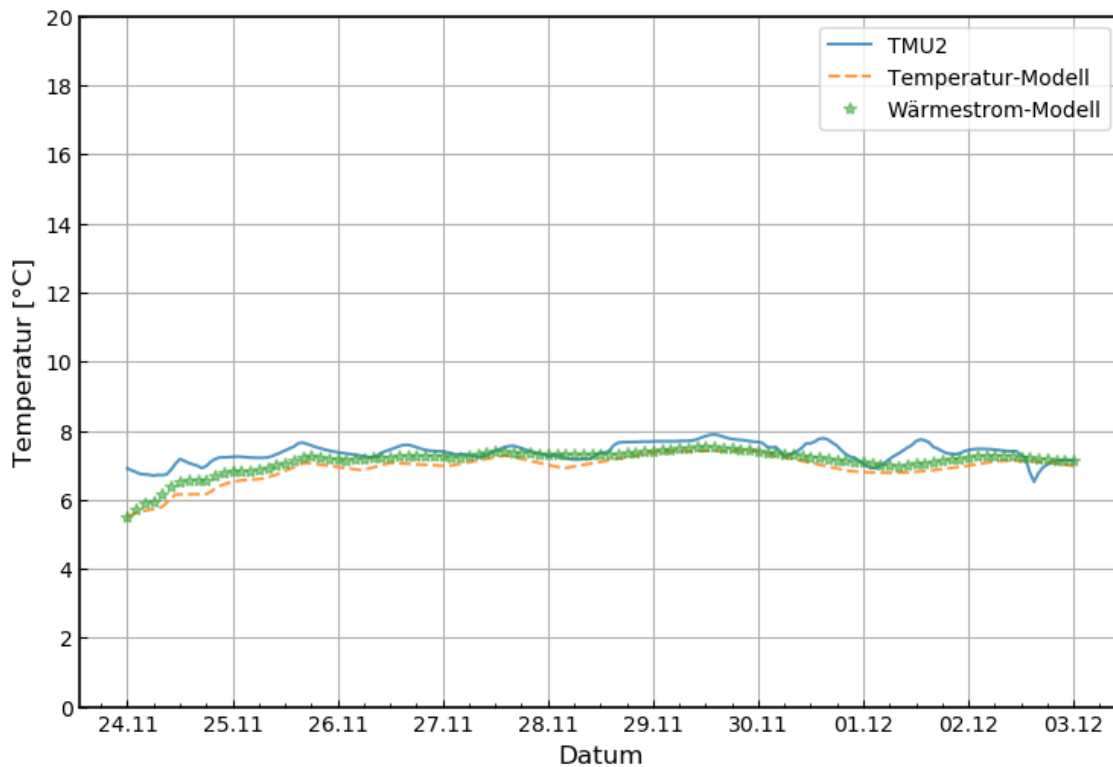


Abb. 5-40 Testfeld B1.2 – Sensor TMU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

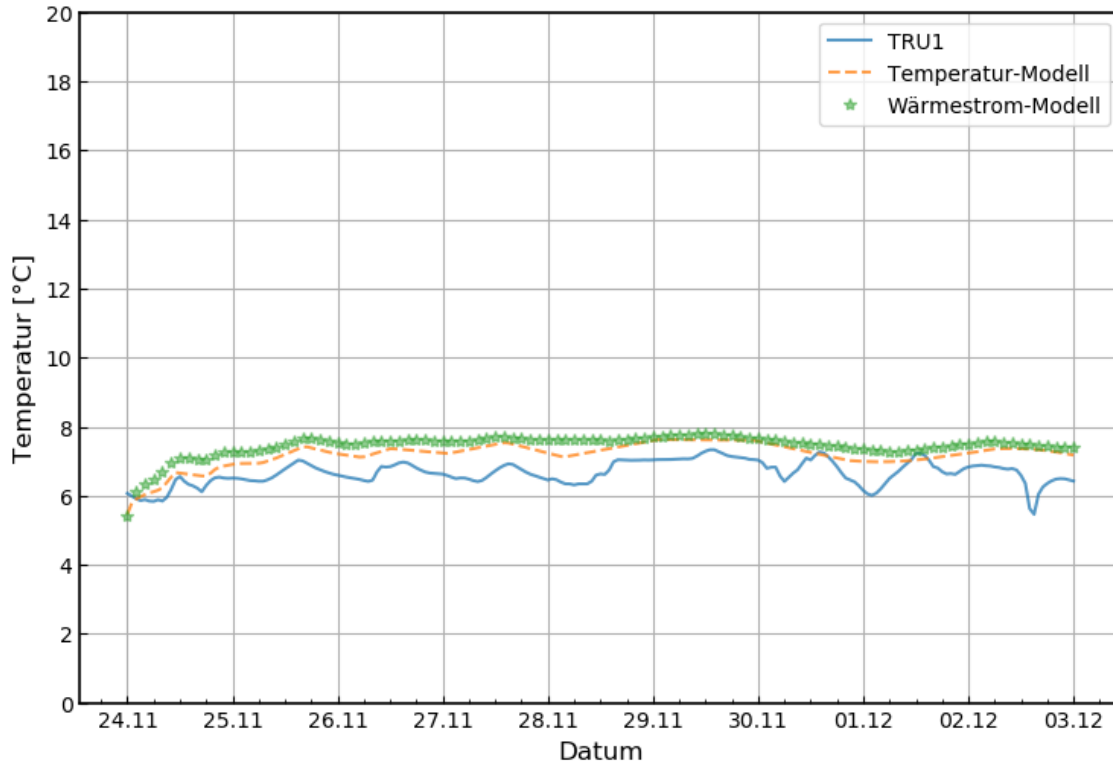


Abb. 5-41 Testfeld B1.2 – Sensor TRU1 - Validierung hochturbulente Durchströmung

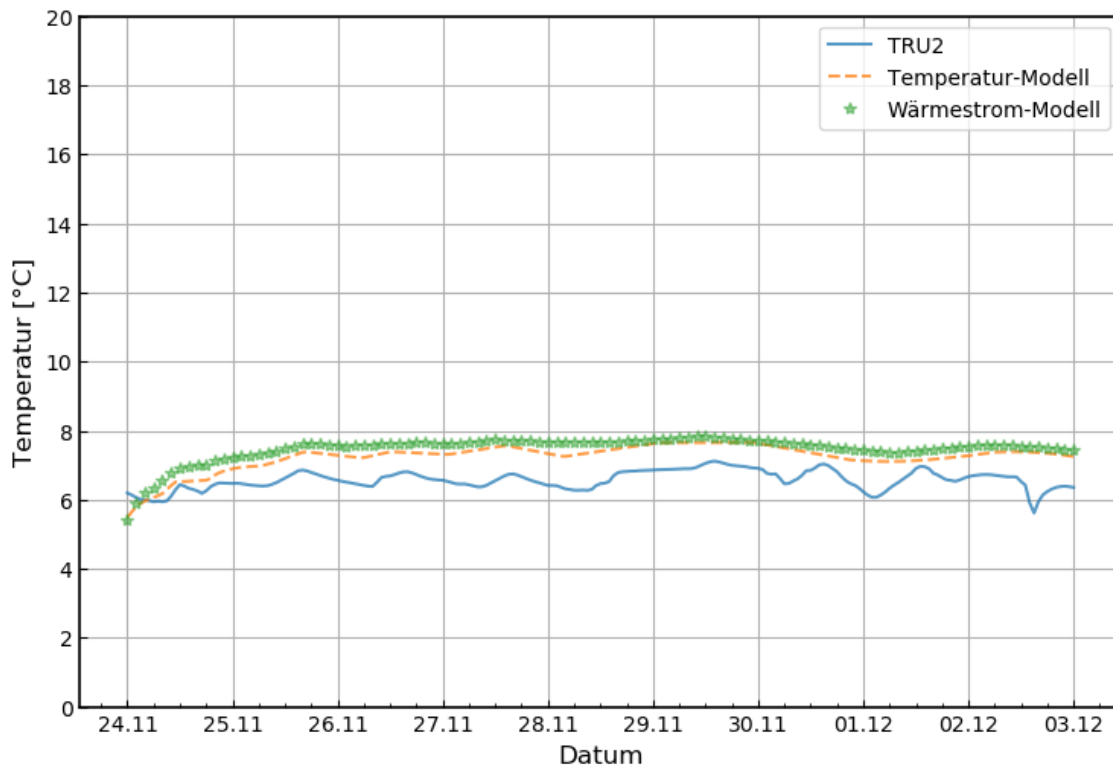
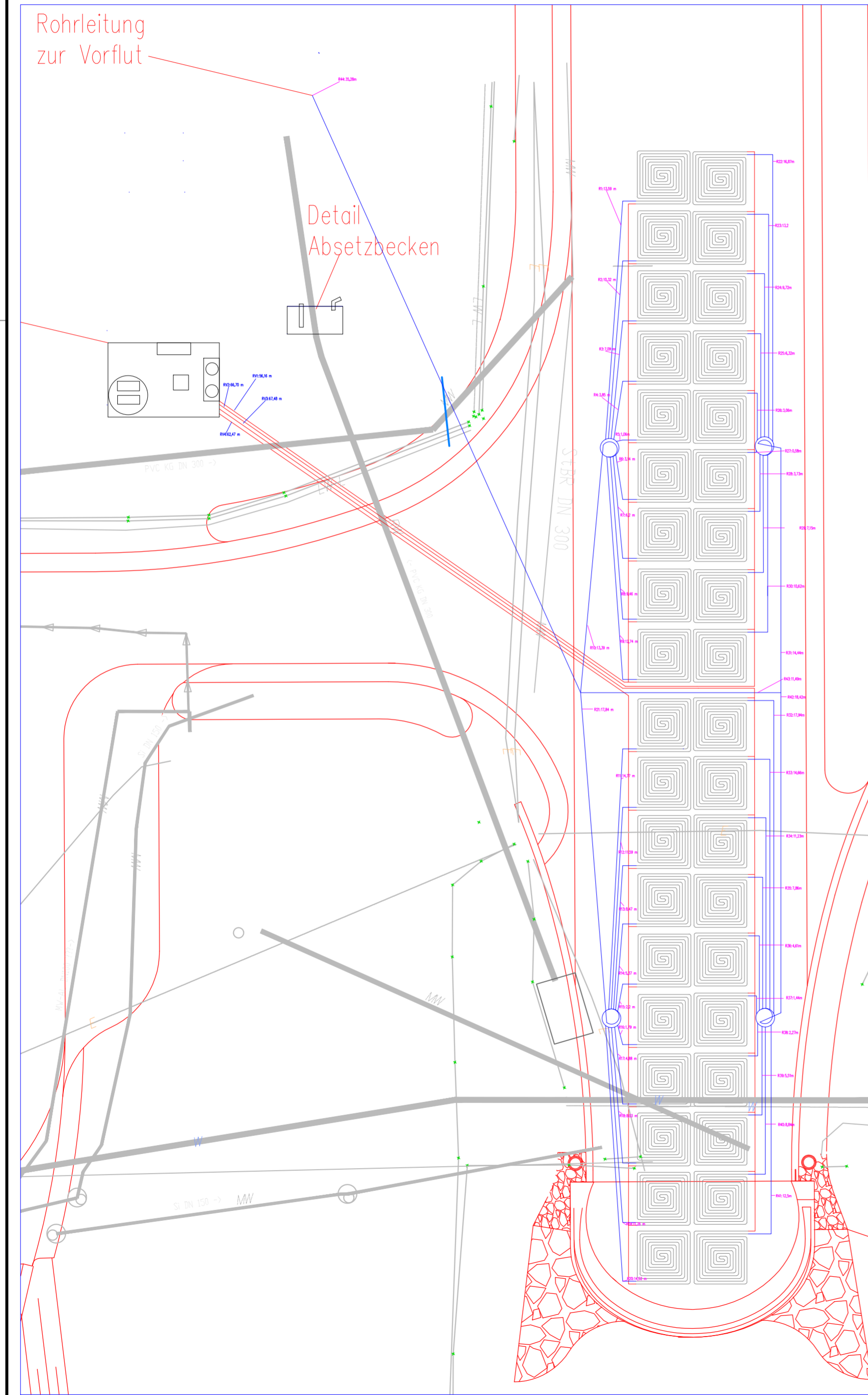
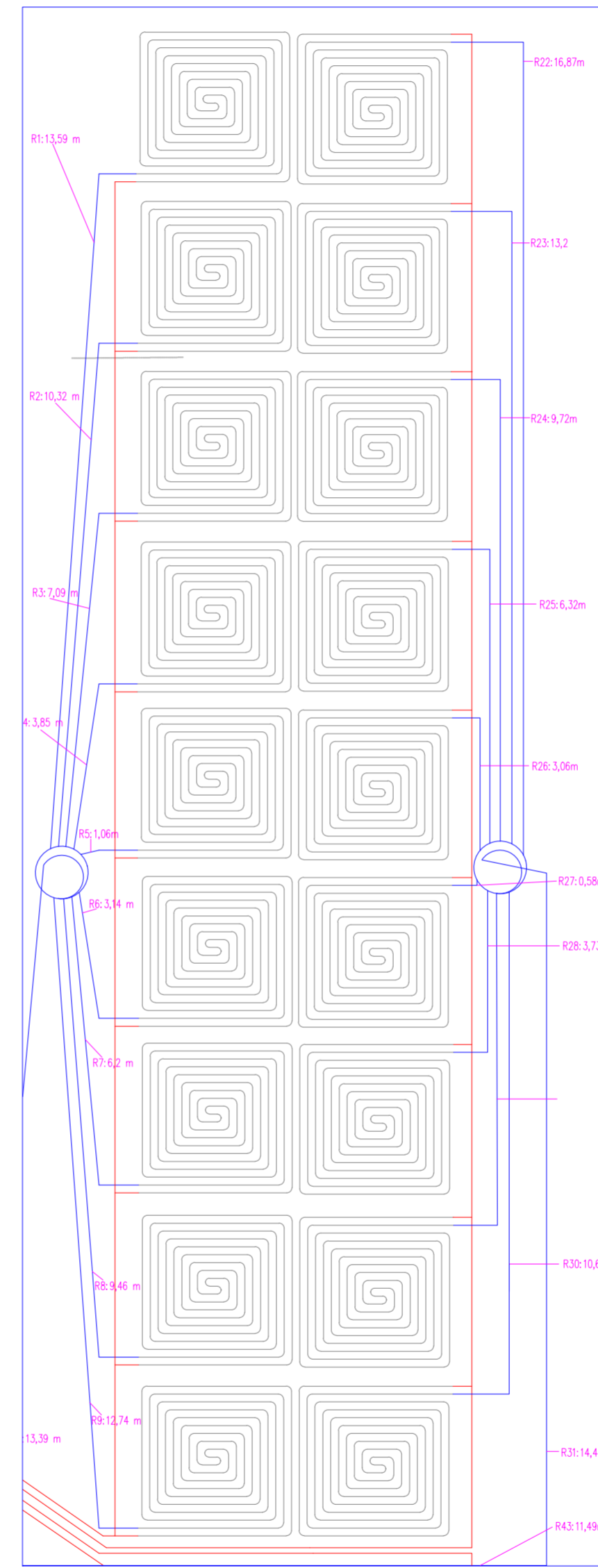


Abb. 5-42 Testfeld B1.2 – Sensor TRU2 - Validierung hochturbulente Durchströmung

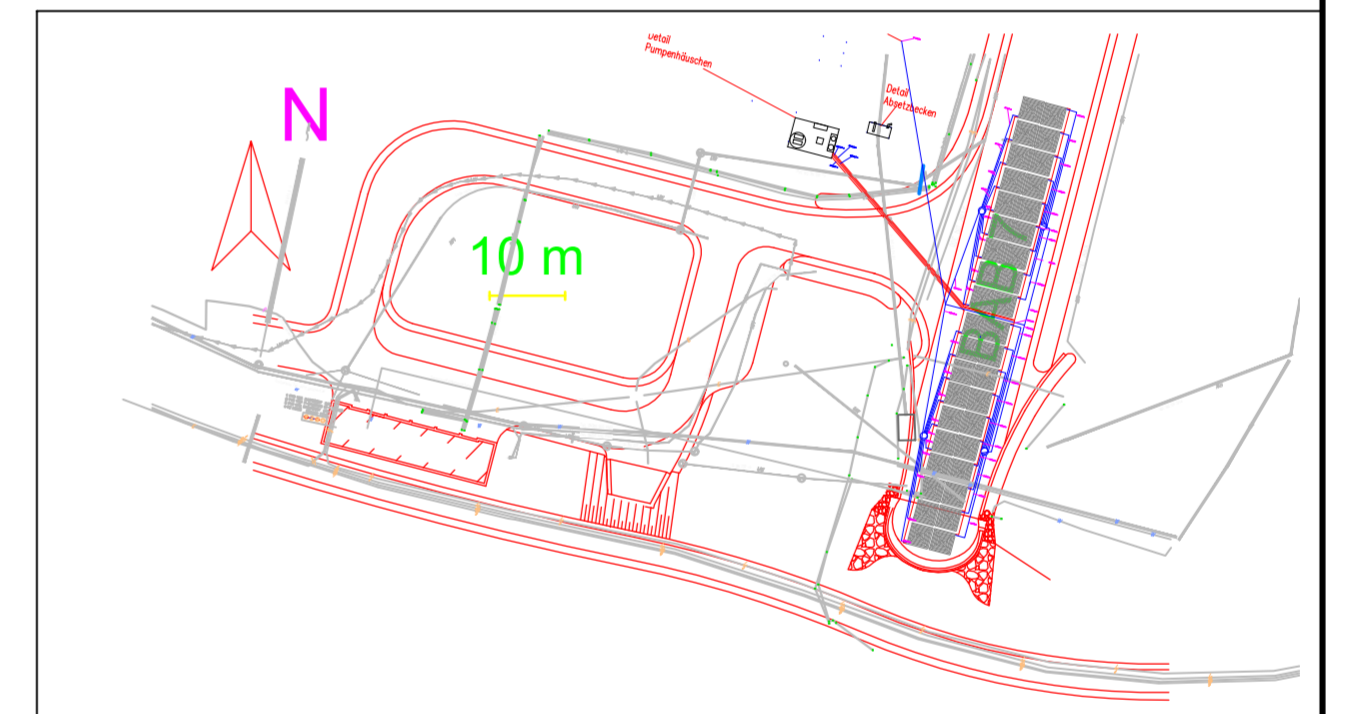
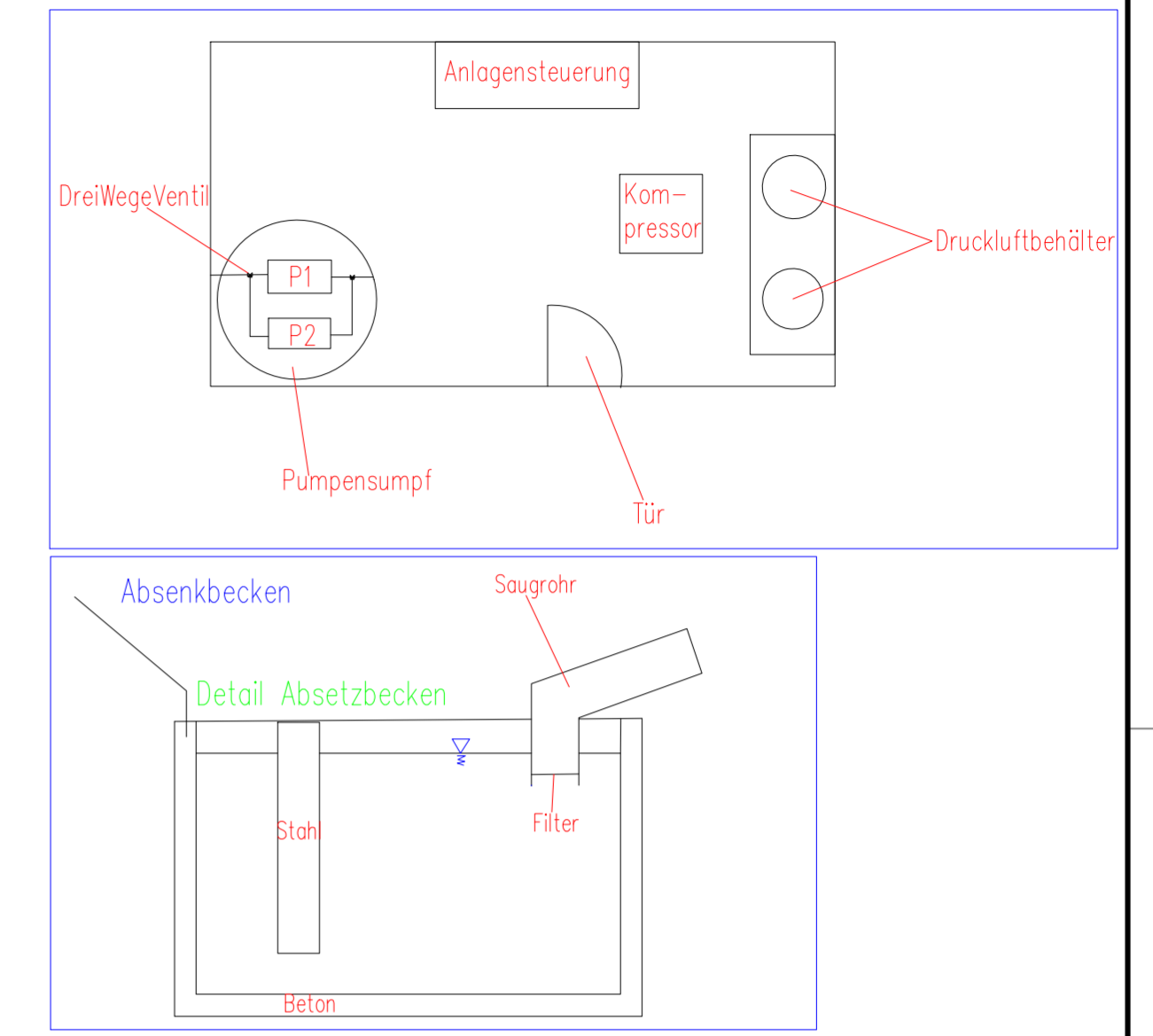
Entwurfsplanung thermische Aktivierung der Autobahn A7 (M 1:200)



Detailzeichnung Freiflächenheizung (M 1:100)



Detailzeichnung Pumpenhaus



M. = 1:1000

Universität Stuttgart - Institut für Geotechnik

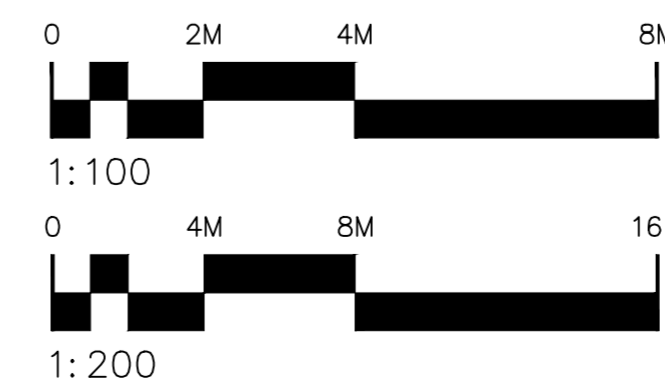
Anschrift: 70569 Stuttgart, Pfaffenwaldring 35  
 Tel.: +49 (0)711 685-63775  
 Fax: +49 (0)711 685-62439  
 eMail: info@igs.uni-stuttgart.de



Thermische Aktivierung der Autobahnfahrbahn A7 Füssen

Nordportal

Anordnung der Freiflächen



**ENTWURFSPLANUNG**

Datum: 20.10.2022	Maßstab: 1:200/100	gez.: TK
Plan-Nr.: FOLGT	Blattgröße: A2	gepr.: XX
Plan-Index: 0	Datei-Code: 2022-10-20-TiefbauTemperierteFläche fertig Layout: Entwurfsplanung	



Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann • Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik • Pfaffenwaldring 35 • 70569 Stuttgart

## Forschungsprogramm Straßenwesen

FE 15.0656/2018/ERB

### „Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen“

### Implementierungshilfe für das Konzept einer direkten, passiven geothermischen Freiflächentemperierung

#### Auftraggeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53  
51427 Bergisch Gladbach

#### Forschungsnehmer:

Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik (IGS)  
Pfaffenwaldring 36  
70569 Stuttgart



**Institut für Geotechnik**

Boden- und Felsmechanik,  
Erd- und Grundbau,  
Fels- und Tunnelbau  
Spezialtiefbau,  
Umweltgeotechnik

#### **Direktor**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.  
Christian Moormann

#### **Kontakt**

Pfaffenwaldring 35  
70569 Stuttgart  
T 0711 685-62437  
F 0711 685-62439  
Christian.Moormann@  
igs.uni-stuttgart.de  
[www.uni-stuttgart.de/igs/](http://www.uni-stuttgart.de/igs/)

#### **Aktenzeichen**

G65.1  
TK/MS  
16.03.2023

#### **Bank**

Baden-Württembergische Bank  
Stuttgart – BW-Bank

#### **IBAN**

DE51 6005 0101 7871 5216 87

#### **SWIFT/BIC**

SOLADEST600

#### **Umsatzsteuer-IdNr.**

DE147794196





## Inhaltsverzeichnis

1 Chemische Untersuchung .....	3
2 Energetische Untersuchung des Bergwassers.....	6
3 Auslegung der Freiflächen .....	9
4 Wasserfassung.....	11
5 Pumpen und Zulaufleitungen.....	11
6 Rücklauf.....	12
7 Havarieszenario.....	12
8 Anlagensteuerung .....	13
9 Weitere Maßnahmen zur Straßenräumung .....	13
10 Umsetzungsphase .....	14
11 Inbetriebnahme.....	14
12 Betriebsablauf .....	15
13 Abbildungsverzeichnis .....	16
14 Literaturverzeichnis .....	17





## 1 Einleitung: Direkte, passive geothermische Freiflächentemperierung

Bei dem von Moormann & Buhmann (2017) [1] entwickelten Konzept einer „*direkten, passiven geothermischen Freiflächentemperierung*“ zirkuliert das bisher ungenutzte Tunnelndrainagewasser direkt und ohne den Einsatz eines Wärmepumpenkreislaufs und ohne Zusatz von Frostschutzmitteln durch die in Freiflächen installierten Rohrleitungen, um diese thermisch zu aktivieren.

Auf den Einsatz von potentiell umweltgefährdenden Kühlmitteln im Sekundärkreislauf kann so verzichtet werden, wodurch sich die Erteilung einer wasserrechtlichen Genehmigung der Anlage vereinfacht. Zudem kann nach erfolgter Energieextraktion das Drainagewasser bedenkenlos der Vorflut übergeben werden.

Der Einsatz solcher Anlagen ermöglicht es, ausgewählte Bereiche vor Tunnelportalen und auf Betriebsflächen im Winter energieeffizient zu beheizen und somit den aufwändigen Winterdienst und Taumittelleinsatz und damit auch den bauwerksschädigenden Eintrag von Chloriden in den Tunnel zu verringern.

Eine Temperierung in Form einer Kühlung im Sommer ermöglicht es zudem die Lebensdauer der Verkehrsflächen zu erhöhen und Spurrillenbildung o.ä. zu reduzieren.

Das Konzept kann zudem um eine Klimatisierung von Tunnelbetriebsräumen ergänzt werden.

Zur Umsetzung einer passiven, geothermischen Freiflächenheizung müssen zum einen die thermische Energiequelle des Bergwassers als auch die Spezifika der Anwendung detailliert untersucht und bewertet werden. Bergwasserdrainagen werden bei Tunneln zum Abbau der auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdrücke bereits beim Bau installiert und sind so bei vielen Tunnelbauwerken vorhanden. Ob sich die Nutzung des geothermischen Potentials lohnt bzw. überhaupt möglich ist, ist bei jedem Tunnelportal spezifisch zu untersuchen. Die nachfolgende Implementierungshilfe soll für potentielle Anwender eine Handreichung sein und erläutern, wie das geothermische Potential einer Tunnelndrainage ermittelt werden kann und wie in einem zweiten Schritt die Umsetzung und Planung einer passiven, geothermischen Freiflächenheizung erfolgreich gelingt.

## 2 Chemische Untersuchung

In Bezug auf [2] geht einer thermischen Bergwassernutzung zwingend eine Überprüfung des Wasserchemismus voraus. Hierfür sind Wasserproben zu nehmen und einem geeigneten wasserchemischen Labor zukommen zulassen. Bei der direkten Wassernutzung erfährt das Bergwasser äußerlich induzierte Temperatur- und Druckänderungen, wodurch physiochemische und mikrobiologische Veränderungen nicht ausgeschlossen werden können.



Um eine langfristige und störungsfreie Nutzung der Anlage zu gewährleisten, ist das Bergwasser auf folgende Störeinflüsse zu untersuchen:

- **Korrosion:**  
Die hydrochemische Zusammensetzung des Wassers kann Korrosionsprozesse für Beton und Eisen hervorrufen.
- **Verockerung:**  
Bei sauerstoffarmen Wässern können bei Vorhandensein von im Wasser gelösten Eisen und Mangan Verockerungen auftreten.
- **Kalkausfällungen:**  
Solange das Lösungsgleichgewicht nicht geändert wird, ist in dem zu erwartenden Temperaturbereich nicht mit Kalkausfällungen zu rechnen.
- **Absetzbare Stoffe – Versandung:**  
Eine generelle Verunreinigung mit absetzbaren Stoffen >1,0 mm, besonders wenn es sich hierbei um organische Stoffe handelt.
- **Verschleimung – Biofilm:**  
Durch erhöhte Mengen an Stickstoffverbindungen oder organischen Substanzen im Tunneldrainagewasser wird ein erhöhtes Wachstum von Pilzen und Bakterien hervorgerufen, das zu einer Verschleimung bzw. Biofilmbildung in der Anlagentechnik führen kann.
- **Aluminiumausfällungen:**  
Für den Fall der Vermischung von Tunneldrainagewässern mit unterschiedlichen pH-Werten, können Aluminiumverbindungen ausfallen und sich in der Anlagentechnik anlagern.

Aus den am Grenztunnel Füssen gewonnenen Erfahrungen kann Kalk nicht nur aus Ausfällungen, sondern auch als Sedimentfracht in die Rohre bzw. Armaturen gelangen. Dieses Phänomen ist nicht auf Kalk beschränkt, sondern kann bei allen löslichen Mineralen vorkommen. Sedimente sind Lockermaterialie, welche sich aus dem Gebirge gelöst haben und sich ggf. in den Rohren anlagern bzw. ansetzen können. Der Problematik der Sedimentablagerung in den Rohren kann durch die Installation von Absetzbecken und Filter präventiv begegnet werden.

Ausfällungen sind Ausscheidungen eines gelösten Stoffes aus einer Lösung durch Änderung von chemischen und thermodynamischen Randbedingungen (pH-Wert, Druck, Temperatur, usw.), d.h. durch die sich in den Rohrregistern rasch ändernde thermodynamische Randbedingungen z.B. in den Rohrwinkeln durch den Formwiderstand bedingt, kann sich das Geschwindigkeitsfeld abrupt ändern und lokal für Druckdifferenzen und ggf. zu Ausfällungen führen.



Sofern der zu untersuchende Tunnel carbonathaltiges Gestein durchquert, sind die Drainagen, welche das Bergwasser zu den Tunnelportalen führen, selbst schon vor Versinterung zu schützen. Üblicherweise werden hierfür Inhibitoren in Tablettenform in die Drainagen eingelegt, welche Kalkausfällungen in der Drainage verhindern sollen, sodass das Kalk in Lösung bleibt. Wie das modifizierte Bergwasser auf die sich ändernden thermodynamische Randbedingungen vor Ort (Pumpenbetrieb, Durchströmung der Rohrregister) reagiert, lässt sich nicht final abschätzen, sodass diesbezügliche Untersuchungen des Wasserchemismus ratsam sind.

Die Untersuchung des Wasserchemismus kann in einem geeigneten Labor mit einer einfachen Wasserprobe durchgeführt werden. Die in der folgenden Tabelle aufgeführten Beurteilungsmerkmale sind zusammen mit den üblichen Konzentrationsbereichen dargestellt. In der dritten Spalte wurden die speziell für Kupfer geltenden Auswirkungen der Konzentrationsbereiche dargestellt. Gute Beständigkeit des Kupfers gegenüber der Inhaltstoffen verhält sich bei den folgenden Symbolen wie folgt:

- „+“ Normalerweise gute Beständigkeit.
- „0“ Korrosionsprobleme können entstehen, insbesondere, wenn mehrere Faktoren mit „0“ bewertet sind.
- „-“ Von der Verwendung ist abzusehen.



Beurteilungsmerkmal	Konzentrationsbereich	Kupfer
Absetzbare Stoffe (organisch)	< 5,0 mg/l	0
Chlorid	≤ 300 mg/l	+
	> 300 mg/l	0
Elektrische Leitfähigkeit	≤ 10 μS/cm	0
	10 bis 500 μS/cm	+
	≥ 500 μS/cm	-
Eisen (Fe) gelöst	≤ 0,2 mg/l	+
	> 0,2 mg/l	0
freie (aggressive) Kohlensäure	≤ 5 mg/l	+
	5 bis 20 mg/l	0
	≥ 20 mg/l	-
Mangan (Mn) gelöst	≤ 0,1 mg/l	+
	> 0,1 mg/l	0
Nitrate (NO <sub>3</sub> ) gelöst	≤ 100 mg/l	+
	> 100 mg/l	0
pH-Wert	≤ 7,5	0
	7,5 bis 9	+
	≥ 9	0
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	≤ 0,05 mg/l	+
	> 0,05 mg/l	-
Hydrogenkarbonat (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	≤ 70 mg/l	0
	70 bis 300 mg/l	+
	≥ 300 mg/l	0
Aluminium (Al) gelöst	≤ 0,2 mg/l	+
	> 0,2 mg/l	0
Sulfate	bis 70 mg/l	+
	70 bis 300 mg/l	0
	≥ 300 mg/l	-
Sulphit (SO <sub>3</sub> ), freies	< 1 mg/l	+

Tab. 2-1 Wasserinhaltsstoffe und relevante Konzentrationsbereiche [2]

### 3 Energetische Untersuchung des Bergwassers

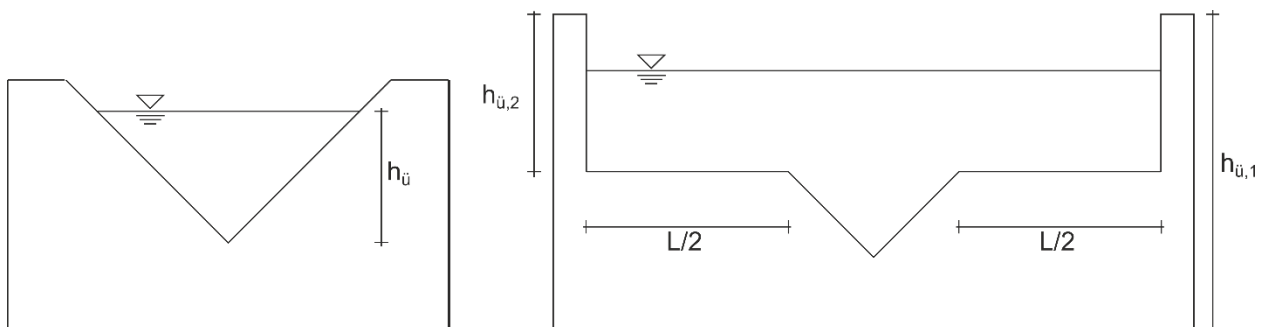
Zur Feststellung des energetischen Potentials des am Tunnelportal austretenden Bergwassers, sollte über einen Zeitraum von mindestens ein Jahr die Temperatur sowie die Schüttung des Drainagewassers gemessen und dokumentiert werden. Die Temperaturmessung kann mittels eines einfachen Temperatursensors mit angeschlossenen Datenlogger im

Studentakt erfolgen. Die Messung der Schüttung kann mittels eines dreieckigen THOMSON-Wehrs bzw. bei großer Schüttung mittels eines COMPOUND-Wehrs, welches die Kombination von zwei rechteckigen und eines dreieckigen Überfalls darstellt, erfolgen. Für die geometrisch definierten Wehre existieren empirische Formeln (siehe (1), (2)), die in Kenntnis der Wasserstandshöhe die Rückrechnung auf die Abstrommenge ermöglichen. Die Wasserstandshöhe kann mittels eines oberhalb des Messwehres angebrachten Ultraschallsensors oder eines Pegelschreibers gemessen werden.

$$\dot{V}_{Thomson} = \frac{8}{15} \mu_a \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\ddot{u}}^{5/2} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{Compound} = \frac{8}{15} \mu_a \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\ddot{u},1}^{5/2} - \frac{8}{15} \mu_b \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\ddot{u},2}^{5/2} + \frac{2}{3} \cdot \mu_c \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot h_{\ddot{u},2}^{3/2} \quad (2)$$

Dabei sind  $\mu_a, \mu_b, \mu_c$  die Überfallbeiwerte [-],  $g$  die Gravitationskonstante und die restlichen Variablen sind räumliche Dimensionen und können den Zeichnungen entnommen werden.



**Abbildung 3-1** Links THOMSON-Wehr, rechts COMPUND-Wehr

Das geothermische Potential bzw. der nutzbare Wärmestrom können mittels folgender Formel (3) ermittelt werden. Das Potential ist konservativ zu ermitteln, i.e. es wird der geringste gemessene Volumenstrom und für den Heizfall die geringste bzw. für den Kühlfall die höchste im Untersuchungsjahr gemessene Temperatur angesetzt. Üblicherweise wird das Bergwasser in eine natürliche Vorflut (Bach, Flüsse, etc.) übergeben, hierbei darf in Anlehnung an [3] Wassereinleittemperatur unter Berücksichtigung der thermischen Nutzung eine minimale Temperatur von 5°C nicht unterschreiten und eine maximale Temperatur von 20°C nicht überschreiten.

$$\dot{Q}_{Geo} = \dot{V}_{min} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta\vartheta \quad (3)$$

$$\dot{V}_{min} = \min(\dot{V}_{Thomson} \text{ bzw. } \dot{V}_{Compound}) [m^3/s]$$

$$\rho_w = \rho_{Wasser,10^\circ C} = 999,7 [kg/m^3]$$

$$c_{p,w} = c_{p,Wasser,10^\circ C} = 4,195 [kJ/kgK]$$



$$\Delta\vartheta_{\text{Heiz}} = (\vartheta_{\text{Drain,min}} - \vartheta_{\text{min,Einleitung}}) [K]$$

$$\Delta\vartheta_{\text{Kühl}} = (\vartheta_{\text{Drain,max}} - \vartheta_{\text{max,Einleitung}}) [K]$$

$$\vartheta_{\text{min,Einleitung}} = 5^{\circ}\text{C}, \vartheta_{\text{max,Einleitung}} = 20^{\circ}\text{C}$$

In besonders schützenswerten Naturräumen ist zusätzlich zur Berücksichtigung des zulässigen Temperaturspektrums die Umweltverträglichkeit der Einleittemperatur auf die nachgeordnete Vorflut zu untersuchen. Ist die Vorflut beispielsweise ein FFH-Gebiet (Flora-Fauna-Habitat) sind die Auswirkungen eines Projektes gemäß § 34 BNatSchG bzw. Art. 6 Abs. 3 FFH-RL hinsichtlich unterschiedlicher Wirkfaktoren zu beurteilen. Die Wassertemperatur ist ein maßgeblicher abiotischer Standortfaktor und kann bei Veränderungen zu Folge- und Synergieeffekten führen, welche z.B. die Wuchsbedingungen von Organismen beeinflusst und zu einer Veränderung von lebensraumspezifischen Charakteristika führen können [4].

Es ist folglich zu untersuchen, ob die Vorflut einen schützenswerten Naturraum darstellt und welche besonderen Grenztemperaturen hier gelten. Hier ist auf die jeweiligen Landesämter für Umwelt zu verweisen, die hierfür üblicherweise Karten und Merkblätter herausgeben. Die Grenztemperaturen können auch ggf. dem Leitfaden der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [5] entnommen werden.

Das Bayerische Landesamt für Umwelt hat bspw. ein Merkblatt Nr. 4.5/18 herausgegeben, welches die Wärmeeinleitung in 'wesentlich' und 'unwesentlich' für den ökologischen Zustand einteilt und hierauf aufbauend eine Relevanzprüfung empfiehlt: „*Die Relevanzprüfung soll es ermöglichen, mit vereinfachtem Aufwand festzustellen, ob eine bestehende oder geplante Wärmeeinleitung als unwesentlich einzustufen ist, weil sie nach aller Wahrscheinlichkeit zu keiner Verfehlung des guten ökologischen Zustandes führen kann.*“ [5]. Relevant für die wasserrechtliche Beurteilung ist die Gewässer-Mischtemperatur, welche von der für das Gewässer prägenden Fischart abhängig ist [6]. Dem Merkblatt ist ebenfalls ein Algorithmus beigelegt, aus dem hervorgeht, welche Behörde für die Erteilung der Genehmigung – sofern erforderlich – zuständig ist.

Bei der Nutzung der Freiflächenheizungen zur Eis- und Schneefreihaltung wird dem Bergwasser Wärme entzogen und kühlt folglich ab. Da die Fließgewässer in Deutschland aufgrund des Klimawandels immer wärmer werden, ist die Einleitung abgekühlten Bergwassers weniger kritisch, als die Einleitung erwärmten Bergwassers.

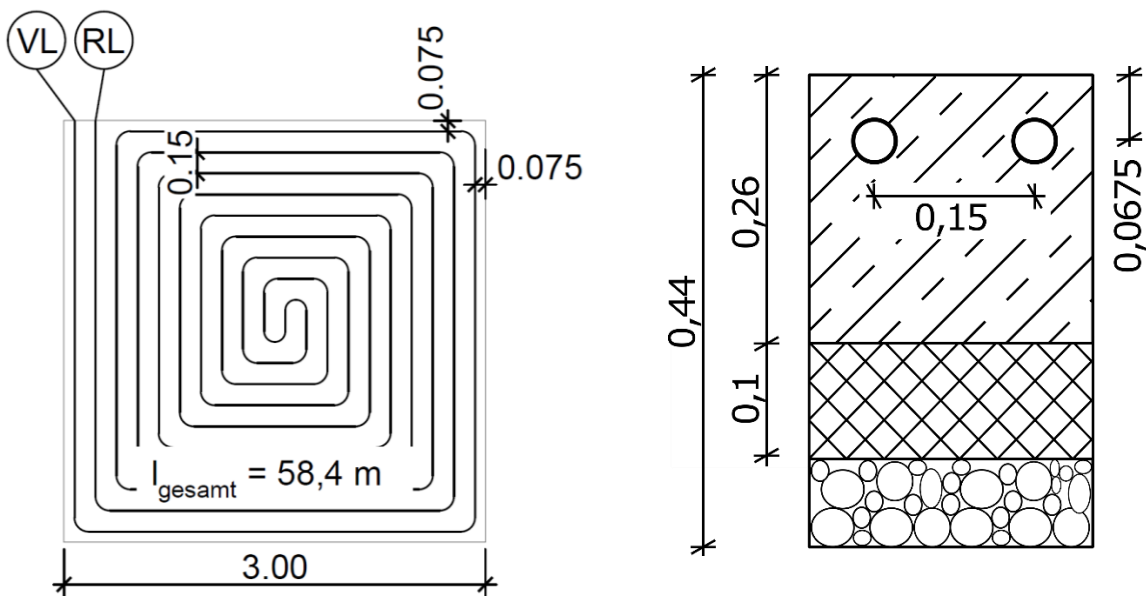
Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass Freiflächenheizungen hauptsächlich zur Eis- und Schneefreihaltung verwendet werden und die Bergwassertemperatur in Deutschland größtenteils durchschnittlich Temperaturen unter 10°C aufweisen, i.e. die Temperaturdifferenz zwischen der Bergwassertemperatur und den 5°C, welche von [3] als untere Grenztemperatur gefordert werden, ist meistens deutlich geringer als die Temperaturdifferenz

zwischen der Bergwassertemperatur und der lokal geltenden maximalen Grenztemperatur. Die Auslegung der Freiflächen erfolgt jedoch hauptsächlich zur Eis- und Schneefreihaltung und daher mit der Temperaturdifferenz zum unteren Grenzwert hin. Da die Temperaturdifferenz zum oberen im Vergleich zum unteren Grenzwert durchschnittlich deutlich höher ist, kann zur sommerlichen Kühlung mehr thermisches Potential mobilisiert werden, i.e. es könnten größere Flächen gekühlt als geheizt werden.

Eine Kontaktaufnahme mit den lokalen Umweltbehörden ist stets empfehlenswert, da nicht alle lokalen Spezifika der Flora und Fauna im Vorhinein ersichtlich sind.

#### 4 Auslegung der Freiflächen

Nachdem die energetischen und wasserchemischen Untersuchungen abgeschlossen und als positiv bewertet wurden, ist die Auslegung der Freiflächen durchzuführen. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit empfiehlt sich die Materialkombination aus Betonaufbau und Kupferrohren. Sofern kein Betonaufbau gewünscht ist, sind auch Aufbauten aus Asphalt in der Kombination mit Kupfer möglich, diese besitzen jedoch ein geringeres Wärmeleitpotential.



**Abbildung 4-1** Exemplarischer Fahrbahnaufbau: Links Draufsicht auf die Rohrkonfiguration, rechts Schnitt durch die Fahrbahn [m].

Die Verlegung soll in beiden Fällen bifilar und mit einem Schenkelabstand von ca. 15 cm erfolgen (siehe **Abbildung 4-1**). Die Rohrfigurationen sind möglichst oberflächennah einzubauen, als minimale Einbautiefe ist ein Wert von 67,5 mm zu wählen. Bei Asphaltaufbauten



ist für die Wahl der Einbautiefe auf mögliche Sanierungsmaßnahmen, bei denen die Deckschicht abgefräst wird, zu achten. Die Kupferrohre sollten einen Mindestdurchmesser von 18 mm besitzen, geringere Durchmesser erhöhen bei gleichen Volumenstroms die Rohrreibung und folglich die erforderliche Pumpenenergie. Bei sehr großen Durchmessern ist eine Biegung der Rohre in den Kurvenradien sehr aufwendig. Üblicherweise erfolgt der Asphalteinbau mit einem Straßenfertiger d.h. auf die Tragschicht wird eine Deckschicht mit einem Straßenfertiger eingebaut, dabei überfährt der Straßenfertiger die Tragschicht. Dies ist jedoch beim Einbau von Rohrregistern nicht möglich, der Straßenfertiger würde die Kupferrohre auch bei Druckluftbefüllung zerdrücken.

Zur Eisfreihaltung und dem Abschmelzen geringer Schneemengen ist in der Regel eine Bemessungsleistung von 400 W/m<sup>2</sup> bei einer Kombination aus Beton- oder Asphaltaufbau und Kupferleitung ausreichend. Die Auslegungsleistung ergibt sich mittels der folgenden Formel (4) zu:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_o - T_i) \quad (4)$$

$\dot{Q}$  Thermische Leistung [W]

$\dot{V}$  Volumenstrom [l/s]

$c_p \cdot \rho$  Produkt aus Kapazität und Dichte des Wassers [J/(Kl)]

$T_o$  Vorlauftemperatur [°C]

$T_i$  Rücklauftemperatur [°C]

Die thermische Leistungsdichte [W/m<sup>2</sup>] ergibt sich aus der Division der thermischen Leistung durch die jeweilige Freiflächengröße. Wie der Formel zu entnehmen ist, ist die thermische Leistung von der Rücklauftemperatur des Bergwassers abhängig. Wie stark sich die Bergwassertemperatur jedoch abkühlt, ist nicht steuerbar, sondern ist das Resultat der im Fahrbahnaufbau herrschenden Wärmeströme.

Die angegebene Bemessungsleistung bezieht sich auf die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur einer Freifläche. Dieser Wärmestrom fließt aber nicht ausschließlich von den Rohrregistern in Richtung der Fahrbahnoberfläche, sondern auch senkrecht in den Boden sowie horizontal aus den Freiflächen hinaus. Der von den Rohrregistern nach oben gerichtete Wärmestrom ist somit nicht derselbe, wie der zu Dimensionierung verwendete Wärmestrom, welcher sich aus der Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur ergibt.

Standortspezifische Spezifika können ggf. geringfügig von den angegebenen Werten abweichen. Um festzustellen, ob die örtliche Lage der Anlage eine höhere Leistungs Bemessung notwendig macht als vorgeschlagen sind die 15 deutschen Referenzregionen gemäß





[7] zu Rate zu ziehen. Befindet sich die Anlage in einer Klimaregion, welche von den Wetterbedingungen in Füssen abweicht ist ggf. ein Zuschlag bzw. eine Abminderung zu berücksichtigen. Allgemein empfiehlt sich mindestens ein Feld mit Sensoren im Fahrbahnaufbau auszustatten um die tatsächlich wirkenden Wärmeströme zu messen. Wenn sich nun ergibt, dass höhere Leistung als  $400 \text{ W/m}^2$  generiert wurden und folglich die Rücklauf-temperatur unter  $5^\circ\text{C}$  fällt, ist sofern möglich eine Erhöhung der Durchströmung zu veranlassen.

Durch Gegenüberstellung des vorhandenen geothermischen Potentials mit der erforderlichen Leistung kann die maximal aktivierbare Fläche ermittelt werden, welche jedoch aufgrund von Leitungsverlusten um einen sinnvollen Faktor (min. 10%) zu reduzieren ist. Die Abmessungen der einzelnen Freiflächen sind in etwa auf  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  festzulegen, ein geringere Abmessung ist unverhältnismäßig in Anbetracht des zusätzlichen baulichen Aufwandes (Anschluss an Vor- und Rücklauf), eine größere Abmessung birgt die Gefahr, dass bei einem Ausfall gleich eine größere Fläche inaktiv ist. Zudem zeigten auch die numerischen Untersuchungen, dass die Effizienz bei größeren Feldern abnimmt.

## 5 Wasserfassung

Die Wasserfassung erfolgt nach dem Überfall über eines der Messwehre in einem Absenkbecken. Das Absenkbecken ist ausreichend groß zu dimensionieren, sodass das Wasser zu Ruhe kommt und sich die Fest- und Schwebstoffe ablagern können. Das Wasser wird im nächsten Schritt oberflächennah aus dem Absenkbecken über ein Saugrohr zum Pumpensumpf gepumpt. Um die verbliebenen Schwebstoffe abzuscheiden, ist das Saugrohr mit einem Filter auszustatten. Die Pumpe hat über eine Umkehrfunktion zu verfügen, sodass das Saugrohr nicht nur Wasser anzieht, sondern zu gegebener Zeit auch angesaugtes Wasser aus dem Pumpensumpf durch den Filter zurück ins Absenkbecken drücken kann. Mit der Umkehr der Strömungsrichtung werden so festgesetzte Partikel wieder gelöst und der Filter gereinigt.

## 6 Pumpen und Zulaufleitungen

Eine Pumpe kann max. ca. 10 Freiflächen energetisch effizient mit Bergwasser durchströmen. Die Auslegung der Pumpen erfolgt mittels Pumpen- und Rohrnetzennlinien. Steuert eine Pumpe eine Großzahl an Feldern ( $>10$ ) an, ist bei Ausfall eines Feldes oder sonstigen Reibungseinflüssen eine Leistungsreduktion der Pumpenleistung zu erwarten. Sofern nur eine Pumpe die Felder durchströmt ist mit einem Leistungsrückgang in allen Feldern zu rechnen. Besitzt eine Anlage jedoch mehr als 10 Felder ist mehr als eine Pumpe



vorzusehen, hierdurch wird die Reibung in den Rohren reduziert sowie auch Redundanzen im System geschaffen.

Die Zulaufleitung, welche die Pumpe mit den einzelnen Freiflächen verbindet, ist sowohl zu dämmen als auch frosttief zu verbauen. Von der Zulaufleitung gehen die Vorlaufleitungen zu den einzelnen Freiflächen ab. Je länger ein Rohr ist, desto größer ist der Reibungsverlust innerhalb der Leitungen, welcher wiederum durch höhere Pumpenenergie zu kompensieren ist. Es ist daher energetisch vorteilhaft, den Abstand zwischen den Pumpen und den Freiflächen möglichst gering zu halten. Die Zulaufleitung ist ebenso wie die Rücklaufleitung mit einem großen Rohrdurchmesser auszuführen, hierdurch wird die Fließgeschwindigkeit innerhalb der Zulauf- und Rücklaufleitung reduziert, was wiederum die notwendige Pumpenenergie und Wärmeverluste über die Strecke reduziert.

Während des Regelbetriebs ist eine leicht turbulente Durchströmungen ( $Re$  ca. 3000) zu wählen, dieser Wert stellt einen guten Kompromiss zwischen dem dimensionslosen Wärmeübergangskoeffizient und der Rohrreibung dar.

## 7 Rücklauf

Am Rücklauf der Felder sollten Durchströmungsmesser und Kugelhähne installiert werden, welche teilgeöffnet und ferngesteuert werden können. Sowohl die Kugelhähne als auch die Strömungsmesser müssen robust und wartungsarm ausgestaltet sein, damit diese nicht durch Ablagerungen negativ beeinflusst werden.

Der Rücklauf von den Feldern zur Vorflut erfolgt über eine Sammelleitung. Wird nicht alles Bergwasser thermisch genutzt, kann das nicht genutzte Bergwasser mit dem in der Sammelleitung gesammelten Rücklauf vermischt werden, hierdurch wird eine kalte Einleitung vermieden.

## 8 Havarieszenario

Bei einer Störung und gleichzeitig Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes droht das Wasser in den Leitungen zu gefrieren, wodurch in Folge der damit verbundenen Volumenzunahme eine Schädigung der Rohrleitungen folgen könnte. Um solche potentiellen Auswirkungen zu vermeiden, sollte in diesem Fall eine Durchströmung der Rohrleitungen mit Druckluft vorgesehen werden, hierfür ist ein Kompressor und ein Druckluftbehälter im Pumpenhaus vorzusehen. Das Volumen des Druckluftbehälters kann bei ca. 13 bar mit ca. 150 l pro Freifläche (i.e. ca. 2,5 l pro Meter Rohrstrecke) bemessen werden. Das Ausblasen der Rohre erfolgt sequenzweise, i.e. jedes Feld wird einzeln für eine kurze Dauer (z.B. 20 Sekunden) ausgeblasen und dann eine längere Zeit (z.B. 20 Minuten) ruhen gelassen.



Dieses Prozedere wird sodann mehrmals (grober Richtwert 7 Wiederholungen) wiederholt. Der Grund hierfür ist, dass die Luft beim Ausspülen der Leitungen ab einem gewissen Punkt über das Wasser hinwegbläst. Durch das Ruhen des Wassers im Rohr sammelt es sich wieder in den tiefer gelegenen Abschnitten der Rohrkonfiguration und kann erst dann wieder ausgeblasen werden. Die Rohre werden durch das Ausblasen nicht gänzlich wasserfrei, das Wasser hat im Gefrierfall jedoch Platz sich auszudehnen und erzeugt folglich keine Frostschäden an den Rohrkonfigurationen. Die tiefsten Abschnitte in einer Rohrkonfiguration entstehen zumeist durch bauliche Abweichungen, welche noch in den Bauleranzen liegen und so bei der Planung nur schwer bestimmt werden können, weswegen bei Inbetriebnahme der Anlage das Havarieszenario hinreichend genau zu testen ist. Das Havarieszenario startet nicht nur bei Strom- und Pumpenausfall sondern auch wenn die Temperatursensoren im Fahrbahnaufbau Temperaturen unterhalb 0°C messen. Nach einem Havarieszenario sollte die Anlage, um eine Abkühlung des Fahrbahnaufbaus zu verhindern, rasch wieder in Betrieb genommen werden. Ist dies aufgrund von Wartungsarbeiten oder ähnlichem nicht möglich sollte die Anlage erst wieder in Betrieb genommen werden, wenn die Temperaturen im Fahrbahnaufbau an allen Sensoren eines Feldes mindestens 24 Stunden oberhalb von 2°C liegen. Durch das Ausblasen der Leitungen wird wie bereits erwähnt nicht das gesamte Wasser aus den Leitungen hinausbefördert, sondern ein Gefrieren des verbliebenen Wassers hingenommen. Zum Schmelzen des Eises innerhalb der Leitungen werden Temperaturen im Fahrbahnaufbau oberhalb des Nullpunktes notwendig, ferner benötigt der Auftauprozess eine gewisse Zeitdauer. Wäre das Eis bei Inbetriebnahme der Anlage nicht gänzlich aufgetaut, könnte es durch das strömende Wasser mitgerissen werden und das Ausgangsventil des Feldes potentiell verstopfen. In diesem Fall könnte auch das Ausblasen der Leitungen nicht das Wasser aus den Leitungen blasen und das Feld wäre gefüllt mit Wasser, im Falle von Frost könnte es hier zu Frostschäden an den Leitungen kommen.

## 9 Anlagensteuerung

Zur Steuerung der Anlage sind Messgeber im Fahrbahnaufbau zu verbauen, welche als Frostwächter dienen und eine Auswertung der wirkenden Wärmeströme erlauben. Zur Erfassung der atmosphärischen Einflüsse sollte eine Wetterstation vor Ort installiert werden. Es bietet sich an, alle Messungen durch eine Software zu erfassen und in Echtzeit darstellen zu lassen, darüber hinaus sollte das Programm Messdaten archivieren können. Aus der Analyse der archivierten Messdaten kann ermittelt werden, ob sich das Verhalten der Anlage über die Zeit ändert, um dann ggfs. Maßnahmen ergreifen zu können.



## 10 Weitere Maßnahmen zur Eis- und Schneefreihaltung der Straße

Je kälter die Außentemperatur, desto niedriger die Dichte des Schnees, wodurch die wärmedämmende Wirkung des Schnees erhöht wird. Konkret bedeutet dies einerseits, dass Schnee, welcher bei niedrigen Außentemperaturen fällt, höhere Schmelzleistungen benötigt um abzuschmelzen, als Schnee, welcher bei wärmeren Temperaturen gefallen ist. Andererseits bedeutet dies auch, dass die von der Freifläche ausgehende thermische Energie – sofern der Schnee zum liegen kommt – sich nahe der Fahrbahnoberfläche staut. Die Fahrbahnoberfläche kann daher trotz darüberliegender Schneedecke deutlich oberhalb der Außentemperatur und dem Gefrierpunkt liegen, wodurch an der Fahrbahnoberfläche kaum mit Eisbildung zu rechnen ist.

Der daraus resultierende praktische Nutzen liegt in der Straßenräumung, Zwar ist bei starkem Schneefall die Oberfläche immer noch mittels eines Schneepflugs zu räumen, aber aufgrund der verhältnismäßig hohen Oberflächentemperatur kann auf das Streuen von Tausalz verzichtet werden. Des Weiteren ist die Freiflächenheizung in der Lage, Glatteis, Blitzeis etc. bei ausreichender Vorlaufzeit eigenständig vorzubeugen.

## 11 Umsetzungsphase

Zum Bau der Freiflächenheizungen ist eine plane Oberfläche notwendig, welche, sofern möglich, nach unten hin gedämmt ist. Auf diese Oberfläche werden die Rohrregister mittels Dübelhaken an der Oberfläche angebracht. Der Einbau der darüberliegenden Deckschicht (Asphalt, Beton) ist im Handeinbau vorzunehmen. Straßenfertiger oder ähnliches eignen sich nicht, die Leitungen würden aufgrund des hohen Gewichtes zerdrückt werden. Allgemein sind regelmäßig Dichtigkeitsprüfungen vorzunehmen. Die Sensoren sind zu kalibrieren und vorsichtig einzubauen, damit eine Beschädigung während des Einbaus ausgeschlossen werden kann. Geringfügige Abweichungen im Bau können sich in den Messungen bemerkbar machen, weshalb der Sensoreinbau auch zu dokumentieren ist.

## 12 Inbetriebnahme

Die Kennlinie des Rohrnetzes, d.h. die sich bei Durchströmung einstellende Rohrreibung, ist im ersten Schritt auf ihre Richtigkeit zu überprüfen. Es empfiehlt sich daher, einige Testläufe durchzuführen, welche auch der Rohrreinigung dienen. Zuvor sind jedoch die Kugelhähne bzw. die Feuchtigkeitssensoren der Kugelhähne vor Verschmutzung zu schützen bzw. auszubauen.

Um sicherzustellen, dass das Ausblasen der Leitungen im Havariefall problemlos abläuft ist dieses im Vorhinein hinlänglich zu prüfen. Hier empfiehlt es sich mit allen beteiligten



Baugewerken in regen Austausch zu stehen und ggf. gewerkeübergreifende Sitzungen abzuhalten. Hierdurch wird sichergestellt, dass aus jeder Fachdisziplin eventuelle Umsetzungshemmnisse etc. besprochen und gemeinsam nach Lösungen gesucht wird.

### 13 Betriebsablauf

Während des Betriebes sollten regelmäßig die Durchströmungs- und Temperaturdaten gemessen und untereinander verglichen werden. Auch sind diese Daten mit Archivdaten zu vergleichen, durch eventuelle Abweichungen lässt sich auf eventuelle Beschädigungen schließen. Eine Erhöhung des Rohrdrucks bei gleichbleibender Durchströmung lässt auf einen Anstieg der Rohrreibung schließen und sollte daher regelmäßig geprüft werden.

Da es - wie bereits erläutert - bei einer Außerbetriebnahme zu unproblematischen Eisbildungen innerhalb der Rohre kommen kann und folglich eine Wiederinbetriebnahme ggf. nicht möglich ist, sollte die Anlage möglichst im Dauerbetrieb laufen. Sofern niedrige Temperaturen, Schneefall etc. ausgeschlossen werden können, kann, um Pumpenenergie zu sparen, die Durchströmung auf eine laminare Strömung ( $Re < 2300$ ) reduziert werden. Dieses Vorgehen wird bereits in der programmierten Steuerung berücksichtigt.

Da sich in den Rohrregistern bzw. Armaturen Sedimente bzw. Ausfällungen aus dem Bergwasser absetzen können, ist die Anlage regelmäßig während des Betriebs „auszuspülen“. Wenn bei gleichbleibender Durchströmungsrate der Rohrdruck zunimmt, kann auf ein Zusetzen der Leitungen durch Ablagerungen etc. geschlossen werden. Um diese Ablagerungen aus den Rohrleitungen zu entfernen, sind Spülvorgänge durchzuführen, i.e. bei laufendem Betrieb werden die Rücklaufventile einzelner Felder verengt bzw. geschlossen, sodass sich der Volumenstrom in den anderen Testfeldern erhöht. Die durch diese Erhöhung des Volumenstroms bzw. Strömungsgeschwindigkeit induzierte Erhöhung der Wandschubspannungen innerhalb der Rohre löst stellenweise die Ablagerungen ab. Bei Wiederöffnung aller Rücklaufventile ist sodann eine Abnahme des Rohrdrucks zu verzeichnen.

In Abhängigkeit von der Verschmutzung der Tunneldrainage wird diese von der zuständigen Behörde (Automeisterei o.ä) in regelmäßigen Abschnitten gereinigt. Hierbei werden u.a. Dampfstrahler eingesetzt, welche Ablagerungen aus den zugänglichen Bereichen der Drainagen entfernen. Dieses „Schmutzwasser“ wird ebenfalls über die Bergwasserleitung aus dem Tunnel geleitet und würde, sofern keine Vorkehrungen getroffen würden, ebenfalls durch die Rohrregister gepumpt werden und diese verdrecken. Für diesen Fall ist die Anlage auszuschalten und das Bergwasser in die übliche Kanalisation umzuleiten.



## 14 Abbildungsverzeichnis

<b>Tab. 1-1</b>	Wasserinhaltsstoffe und relevante Konzentrationsbereiche [2]	6
<b>Abbildung 2-1</b>	Links THOMSONWEHR, rechts COMPUND-WEHR	7



## 15 Literaturverzeichnis

- [1] Moormann, Ch., Buhmann (2018): Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bericht Nr. B 141
- [2] Moormann, Ch., Buhmann, P. (2017): Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bericht Nr. B 141, Anlage VI – Laboruntersuchung Füssen
- [3] VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2010): Thermische Nutzung des Untergrunds, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte ICS 27.010. Beuth Verlag GmbH, Berlin ICS 27.010, VDI 4640 Blatt 1.
- [4] Bundesamt für Naturschutz (2014): FFH-VP-Info: Fachinformationssystem zur FFH Verträglichkeitsprüfung. Bundesamt für Naturschutz. Leipzig.
- [5] Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2013): „Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer“. Kulturbuch-Verlag, Berlin.
- [6] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Merkblatt Nr. 4.5/18 Beurteilung von Wärmeeinleitungen, Referat 68. 2013
- [7] DIN V 18599-10 (2018): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Beuth Verlag GmbH, Berlin.